ENDEAVOUR

Revista trimestral designada a registrar el progreso
de las ciencias al servicio de la humanidad

VOLUMEN VII ABRIL 1948 NUMERO 26

Macromoléculas

De todos los fenómenos naturales es la vida el más enigmático. « El hombre es el estudio más propio del hombre,» dice el aforismo, y el científico puede muy bien interpretarlo dentro de su propia esfera de acción dándole el significado de que el principal fin de la ciencia es la comprensión de ese complejo de propiedades que distingue la vida de la muerte. Muchos puntos de vista hay respecto a tal problema, pero el adoptado por la Química orgánica ha resultado, hasta ahora, el más provechoso; lo que quizás explica el que nunca le haya faltado muchedumbre de entusiastas seguidores: las substancias orgánicas se hallan tan estrechamente relacionadas con la vida y con las necesidades humanas fundamentales que no pueden menos de ofrecer un interés radicalmente distinto del de los compuestos inorgánicos.

Sin embargo, hace unos treinta o cuarenta años la Química orgánica parecía hallarse en un callejón sin salida hacia la revelación del mecanismo vital. El investigador podía hallar cierta satisfacción en la contemplación de los vastos conocimientos acumulados durante el siglo precedente. Dicha satisfacción quedaba contrarrestada por el triste hecho de que numerosos compuestos orgánicos de máxima importancia e interés — proteínas, goma, y almidón, por ejemplo — no podían describirse más que en términos generales, ya que si bien las líneas esenciales de su estructura eran conocidas, los detalles aparecían oscuros, y la posibilidad de síntesis muy remota. Así, en el campo de la Química proteínica, se había llevado a cabo favorablemente la unión de algunos amino-ácidos para formar simples polipéptidos; pero aunque ello tenía gran valor para confirmar y extender el conocimiento de las proteínas, sólo el químico más entusiasta podía suponer seriamente que la mera extensión de dicho proceso podía conducir a la satisfactoria sintetización de las proteínas. Idénticos problemas obstaculizaban el avance en todos los demás campos de la Química orgánica en que las macromoléculas eran un elemento esencial; los métodos disponibles eran inadecuados tanto para descubrir todos los detalles de su estructura como para conseguir una posible síntesis, aun en el caso de que aquélla llegase a determinarse

Tal dificultad resultó ser sólo provisional y, como tantas veces sucediera en el pasado, el progreso fué el resultado no sólo de la aplicación de los conocimientos ya existentes sino también de nuevas inspiraciones y técnicas avanzadas. Era lo más necesario obtener un método más provechoso para la elucidación de la estructura macromolecular y su síntesis; y entre los nuevos métodos, el más notable es el análisis radiográfico, que ha probado ser de inmenso valor para la determinación de la naturaleza del núcleo repetitivo en las moléculas de cadena larga, y, en su forma más reciente, ha servido para establecer la completa configuración atómica de moléculas de gran tamaño, no polimerizadas, tales como las del colesterol y la penicilina.

Otro instrumento valiosísimo para la investigación de las macromoléculas es la ultracentrífuga, cuyo desarrollo ha sido obra, principalmente, de un grupo de investigadores dirigidos por The Svedberg, de quien publicamos un artículo sobre dicho tema en un número de ENDEAVOUR de 1947. Método de análisis también muy fructífero, en especial por lo que se refiere a las proteínas, es el de partición cromatográfica desarrollado por A. J. P. Martin y sus colaboradores (ENDEAVOUR, Enero 1947) que ha hecho practicable el análisis semi-cuantitativo de proteínas en cantidades mínimas, mucho menores de lo que se hubiera considerado posible hace tan sólo cinco años. La aplicación de dicho método ha producido ya numerosos datos sobre el orden de los residuos amino-ácidos en diferentes proteínas, junto con

otros detalles estructurales, y sus posibilidades para la investigación de problemas de este tipo son inmensas.

La investigación sobre la síntesis de las macromoléculas ha resultado en un progreso paralelo al de su análisis; hace cuarenta años se conocía muy poco acerca del mecanismo de la polimerización, sin que existiese un mercado para los polímeros sintéticos. La polimerización se consideraba, en la mayoría de los casos, como una reacción secundaria y embarazosa que se inmiscuía en investigaciones de mayor importancia. Pero el cuadro de hoy día es totalmente diferente: los conocimientos recientes de la estructura de los polímeros naturales han causado el avance de la Química teórica e incrementado al mismo tiempo el número de aplicaciones prácticas de dichas substancias. La manufactura de los polímeros se ha convertido en rama importante de la industria química, y muchos de sus productos tienen un papel muy importante en nuestra vida diaria.

Tan notables resultados fueron en parte obtenidos mediante la perfección de los nuevos procesos analíticos y sintéticos, y en parte por la evolución de una nueva actitud mental respecto a la síntesis de las macromoléculas. La impracticabilidad de enlazar sucesivamente pequeños núcleos, tales como los azúcares y amino-ácidos, para formar grandes moléculas, cuyo peso molecular podía medirse en decenas de millar, había sido ya reconocida; se orientó entonces el trabajo hacia un método de polimerización de simples substancias, de modo rápido y sencillo, evitando la complicación de las reacciones laterales. El resultado, durante los últimos años, ha sido la producción de numerosos polímeros, y entre ellos la goma artificial, Perspex, y Politeno.

Queda ahora por ver hasta qué punto la polimerización controlada de substancias simples, o de una mezcla de las mismas, puede ser utilizada para la sintetización exacta de polímeros naturales tales como las proteínas. Sabemos que aunque muchos de ellos pueden consistir de relativamente escasos tipos de núcleos repetitivos — una docena de amino-ácidos diferentes, por ejemplo — el orden y frecuencia de los mismos puede presentar extraordinaria complejidad; la obtención de idéntico orden y frecuencia por directa polimerización de los núcleos simples exigirá un control más delicado que el que en la actualidad poseemos. Lo más que podemos intentar hoy es la sintetización de polímeros que tienen idéntica configuración atómica en general, y, por consiguiente, propiedades, análogas que los polímeros naturales. Muy bien puede ser que la precisa duplicación de los polímeros naturales necesite aún el descubrimiento de métodos hoy día desconocidos.

El artículo principal de este número, del Profesor Linus Pauling, estudia los anticuerpos y las fuerzas biológicas específicas, rama en la que son bien conocidos sus trabajos. Dicho artículo muestra la extensión de nuestro conocimiento de las macromoléculas y, al mismo tiempo, indica la estrecha relación existente entre diversas ramas de la ciencia que hace sólo unos años parecían divergir. La teoría quántica, por ejemplo, propugnada en primer término para explicar ciertas características de la radiación de los cuerpos oscuros ha probado ser valiosísima en la investigación de la naturaleza de los enlaces químicos. La comprensión de las fuerzas que unen a los átomos y a las moléculas hacen posible la esperanza de que finalmente sea factible expresar los fenómenos vitales en términos de la estructura molecular del organismo. Ningún problema presenta a la ciencia mayor importancia que éste, que es asimismo fundamental en la Medicina: la comprensión de la relación entre anticuerpo y antígeno. Y el que sea hoy posible tratar, en términos generales, de dicha relación dentro del ámbito de una teoría científica establecida, sirve de medida de la rapidez del avance que ha realizado durante los últimos años el estudio de las macromoléculas. Otra piedra miliar superada en el camino hacia la elucidación del problema de la vida, a la que de nuevo hemos llegado mediante el ejercicio del ingenio, la invención y « el profundo pensamiento, el fino equilibrio entre la verdad de la observación y la facultad imaginativa de modificar los objetos observados ».

Redactor: E. J. HOLMYARD, M.A., M.Sc., D.Litt., F.R.I.C.
Redactor auxiliar: TREVOR I. WILLIAMS, B.A., B.Sc., D.Phil.
Ediciones extranjeras: J. A. WILCKEN, B.Sc., Ph.D.

Imperial Chemical Industries, Nobel House, Buckingham Gate, Londres, S.W.1

Los anticuerpos y las fuerzas específicas biológicas

LINUS PAULING

El progreso de la Química orgánica durante el último siglo ha hecho posible la identificación de muchas substancias simples que se hallan en las células vivas, así como también la comprensión de procesos químicos tales como la respiración y excretación. Con todo, sólo en fecha reciente, parece haberse establecido una firme base de conocimiento y técnica de investigación que permita la eventual elucidación de problemas tan complejos como el de la relación entre anticuerpo y antígeno, con otros fenómenos de vida fundamentales.

Recientemente se ha obtenido un avance muy significativo en el estudio del problema de la naturaleza de las fuerzas específicas biológicas, así como del problema, relacionado con el anterior, del mecanismo de producción de moléculas complejas biológicas con propiedades específicas. Por ejemplo, los animales pueden sintetizar diversas proteínas que cumplen especiales funciones, tales como la hemoglobina que transporta oxígeno desde los pulmones a los tejidos. La molécula de hemoglobina es grande y compleja; contiene unos 10.000 átomos, y su peso molecular es de 68.000; tiene la propiedad de combinarse reversiblemente con el oxígeno, y reacciona en presencia del anhidrido carbónico tendiendo a liberar el oxígeno combinado. Dichas propiedades presentan variaciones que tienen particular utilidad en el caso de cada especie distinta.

El problema del método de formación de la hemoglobina en su forma molecular especial por cada animal es sólo un aspecto del problema más general de la fabricación de substancias específicas biológicas. Por ejemplo, una molécula de un virus puede, en un ambiente propicio (que le suministra su anfitrión), producir copias exactas de sí misma, y el fenómeno de la herencia depende de la parecida acción autocatalítica de las moléculas de los genes que se hallan presentes en los cromosomas y en el citoplasma de las células.

La especificidad que muestra el sistema de sintetización de las células en la producción de moléculas de hemoglobina de un tipo determinado o de otras substancias biológicas complejas con propiedades específicas, se observa también en otros muchos fenómenos. Un ejemplo interesante de la especificidad de dichas propiedades lo hallamos en los anticuerpos, substancias producidas por un animal tras habérsele inyectado una substancia foránea, el antígeno; en general, los anticuerpos que son producto de la reacción tras la inyección de un antígeno dado, tienen el poder de combinarse con el antígeno homólogo usado en su producción, y no con otras substancias, a excepción de las que poseen una estructura molecular muy semejante.

Los trabajos de Karl Landsteiner contribuyeron grandemente a la obtención del actual conocimiento de la naturaleza de las reacciones serológicas. Tras haber descubierto los grupos sanguíneos humanos, Landsteiner inició una serie de estudios experimentales de penetración. Gran importancia tuvo su descubrimiento de la posibilidad de forzar a un animal a producir anticuerpos que poseen la facultad de combinación específica con varios grupos químicos de estructura conocida. Comenzando sus investigaciones en 1917, preparó, con sus colaboradores, antígenos artificialmente conjugados por medio del enlace a proteínas de substancias químicas relativamente simples; inyectó luego estos antígenos artificiales (azoproteínas, comunmente, con la estructura proteína—N=N—R, obtenidas mediante la unión de una amina diazóica con la molécula proteínica) en el animal, produciéndose antisueros que se halló contenían anticuerpos con la facultad de combinarse con la proteína usada en la preparación de la azoproteína, y también anticuerpos con la facultad específica de combinarse con el grupo enlazado de estructura conocida, al que Landsteiner dió el nombre de grupo hapténico. El método más útil para el estudio del poder de combinación entre los anticuerpos y los antígenos homólogos es el método de precipitación, puesto que un antisuero, mezclado en las proporciones debidas con una solución del antígeno homólogo forma con éste un precipitado, lo que por lo general no puede realizar con otras substancias. Por ejemplo, Landsteiner preparó

una azoproteína diazotando el ácido *p*-aminobenzóico, NH_2 COOH, enlazándolo con albúmina de huevo para obtener la azoproteína

proteína(—N=N COOH)$_n$,

que contiene diversos grupos hapténicos unidos a cada molécula de proteína; halló que el antisuero producido mediante la inyección en un conejo de esta azoproteína no sólo tenía la facultad de formar un precipitado con una solución de la azoproteína original, hecha de albúmina de huevo, sino que también podía formar precipitados con soluciones de azoproteínas preparadas a base de otras proteínas, tales como albúmina de suero bovino, mediante el enlace con ácido *p*-aminobenzóico diazotado. Esta propiedad de precipitación con cualquier azoproteína que contenga el grupo iónico *p*-aminobenzóico muestra que el anticuerpo ha desarrollado el poder de combinarse con dicho grupo hapténico, poder que es, además, altamente específico (aunque no completamente): el anti-suero no forma un precipitado con una azoproteína formada a base del enlace con una proteína de una substancia sin parentesco, tal como el ácido *p*-aminosuccinanílico diazotado, pero tiene la propiedad de formar una pequeña cantidad de precipitado con azoproteínas basadas en substancias estrechamente relacionadas, tales como las constituídas a base de un ácido *p*-aminobenzóico substituído, con un grupo o átomo como el metil, o el cloro, también unidos al anillo bencénico.

El cuadro que sigue del proceso de formación de los anticuerpos bajo la influencia de una molécula antígena fué el resultado del vigoroso esfuerzo realizado para establecer la estructura más simple que, a base de los datos conseguidos sobre las fuerzas intramoleculares e intermoleculares, pudiera servir para una molécula que poseyese las propiedades observadas en los anticuerpos, determinándose asimismo el más simple proceso de formación posible de tales moléculas [2]. Dicha teoría de la estructura y proceso de formación de los anticuerpos se basa sobre los conceptos de que las fuerzas entre un anticuerpo y su antígeno homólogo son las fuerzas de campo limitado que se sabe existen entre las moléculas simples, y que su gran especificidad resulta de una detallada « complementaridad » de su configuración, que se extiende sobre una superficie considerable de la molécula antígena y la correspondiente región combinadora de la molécula anticuerpo. Este concepto de especificidad de las reacciones serológicas como resultado de la complementaridad estructural fué sugerido originariamente por Breinl y Haurowitz [3], y después presentado independientemente por Jerome Alexander [4] y Stuart Mudd [5]. Ya se encuentran rastros del mismo en la obra más temprana de Ehrlich (en su teoría de « la cerradura y la llave ») y de Bordet. El concepto de la multivalencia de las moléculas anticuerpo, incorporado ahora a dicha teoría se debe a J. R. Marrack [6], habiendo sido comprobado mediante los trabajos de Michael Heidelberger. Numerosos estudios experimentales llevados a cabo en Pasadena desde 1940 han suministrado asimismo pruebas en favor de la teoría de la complementaridad y también de la multivalencia de los anticuerpos.

Describamos, pues, el inmediato precursor de una molécula de globulina-γ normal en la forma de una cadena polipéptida que contiene mil o más residuos amino-ácidos, organizados en una secuencia determinada por la naturaleza del sistema de enzimas y las estructuras reticulares que constituyen la célula en la que se está sintetizando la globulina-γ. Suponemos que dicha cadena polipéptida puede convertirse ya en una molécula de globulina-γ normal, o ya en una molécula anticuerpo con un poder de combinación específico para un antígeno arbitrario, según la manera en que se pliegue la larga y compleja cadena polipéptida. Cuando dicha cadena está sintetizada en la célula, en la ausencia de moléculas extrañas, tenderá a enrollarse en la configuración más estable en las circunstancias normales dentro de la célula, produciendo una molécula de globulina-γ normal. Por el contrario, si hay dentro de la célula una molécula extraña — una molécula antígena — el ambiente en el que se halla la cadena polipéptida de globulina-γ es diferente, y tal diferencia puede causar la estabilización de alguna de las demás configuraciones que le son posibles a la cadena, esto es: la que posea el máximo poder de atracción de la molécula antígena. Este proceso hipotético produce un método automático mediante el cual se crea una molécula que tiene una estructura complementaria con una porción de la superficie de la molécula antígena, proceso semejante al de la producción de una moneda mediante un cuño, o a la producción, en general, de un objeto plástico por compresión contra un molde, seguida de su endurecimiento. La cadena polipéptida, con su facultad de asumir configuraciones diversas, es el material plástico y la superficie del antígeno hace el papel del molde; el proceso de

I

II

III

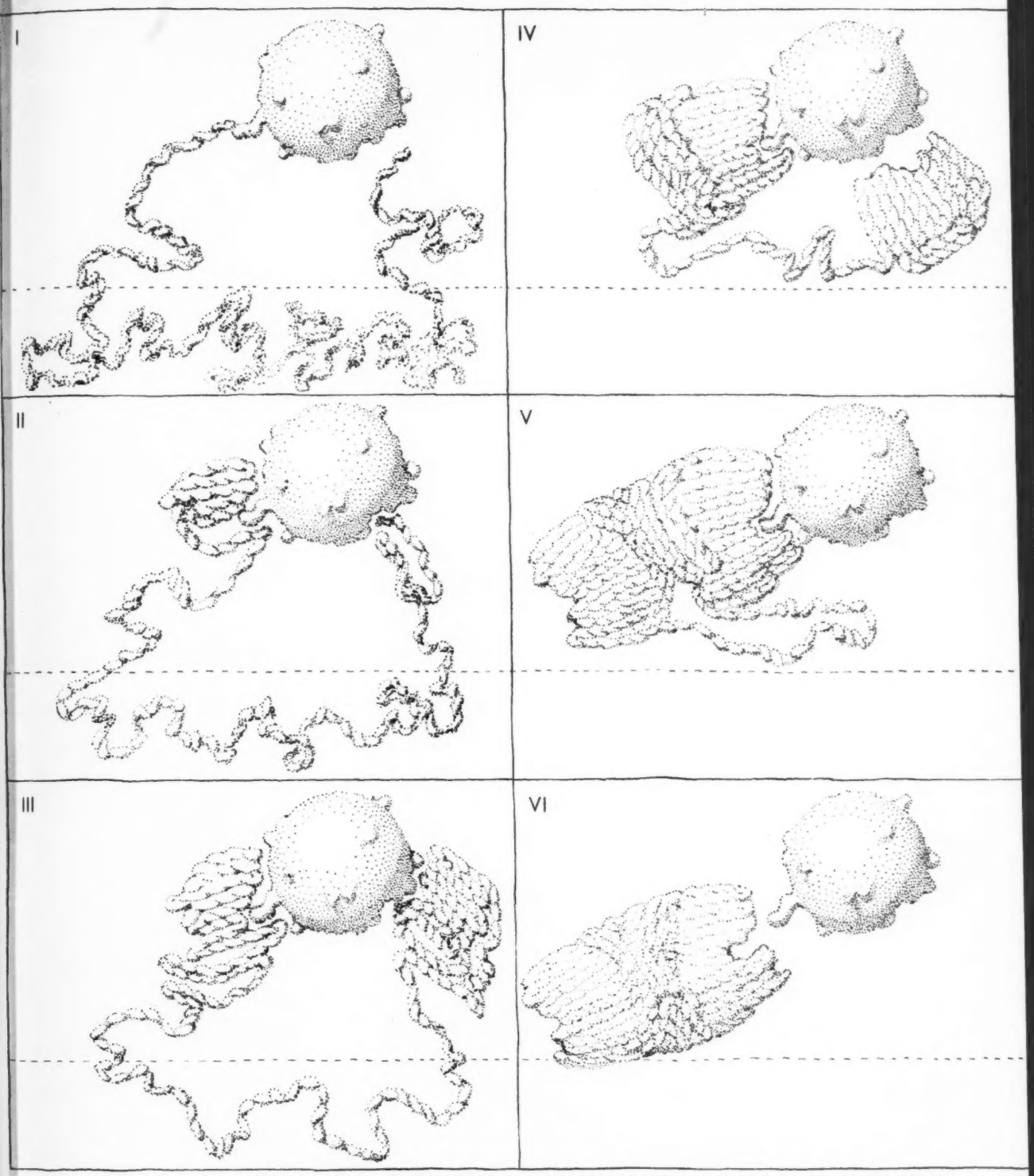


FIGURA 1 – *Proceso hipotético de formación de moléculas anticuerpo por medio del plegamiento de la cadena polipéptida del precursor del anticuerpo en presencia de una molécula antígena, formando configuraciones complementarias a esta última.*

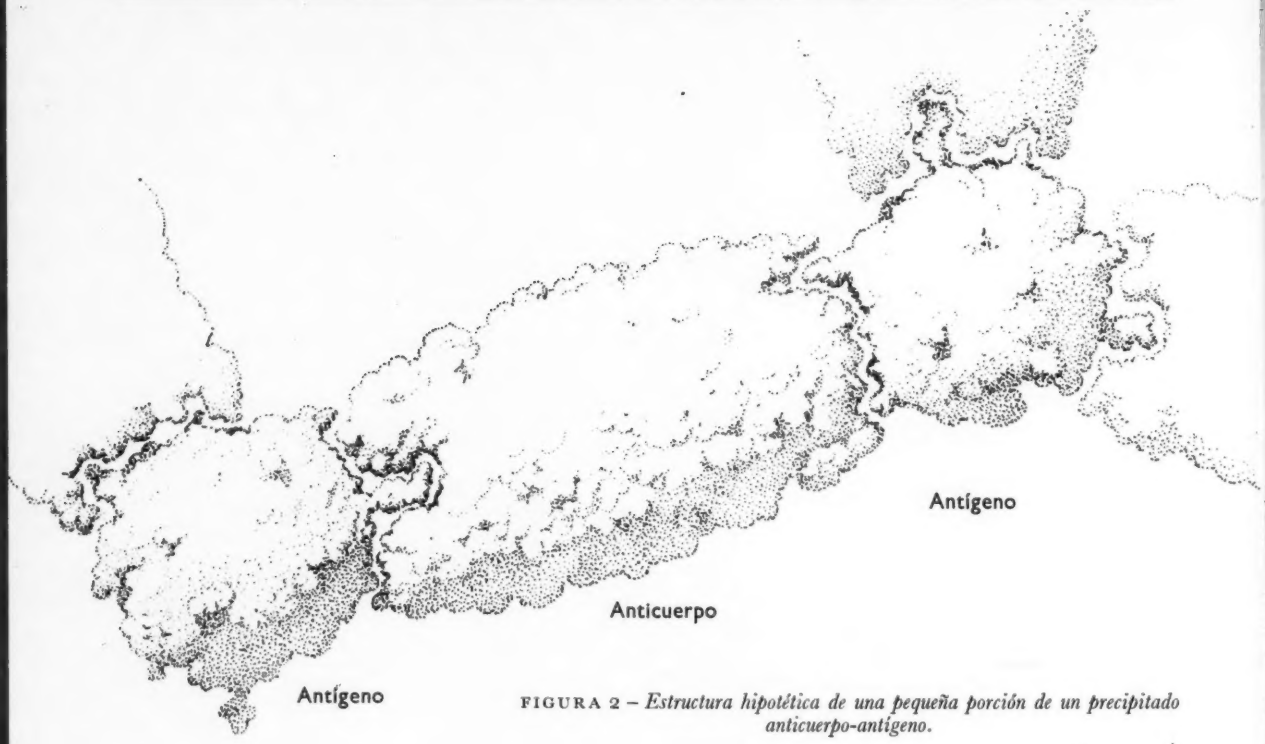


FIGURA 2 – *Estructura hipotética de una pequeña porción de un precipitado anticuerpo-antígeno.*

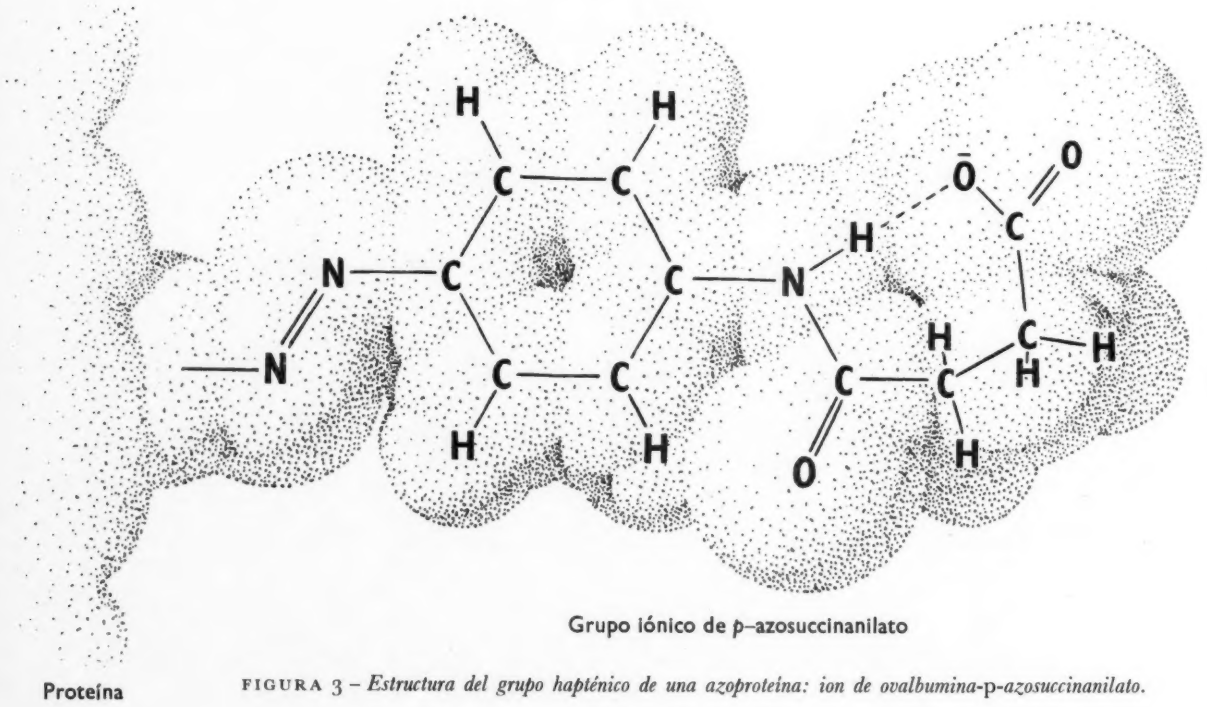


FIGURA 3 – *Estructura del grupo hapténico de una azoproteína: ion de ovalbumina-*p*-azosuccinanilato.*

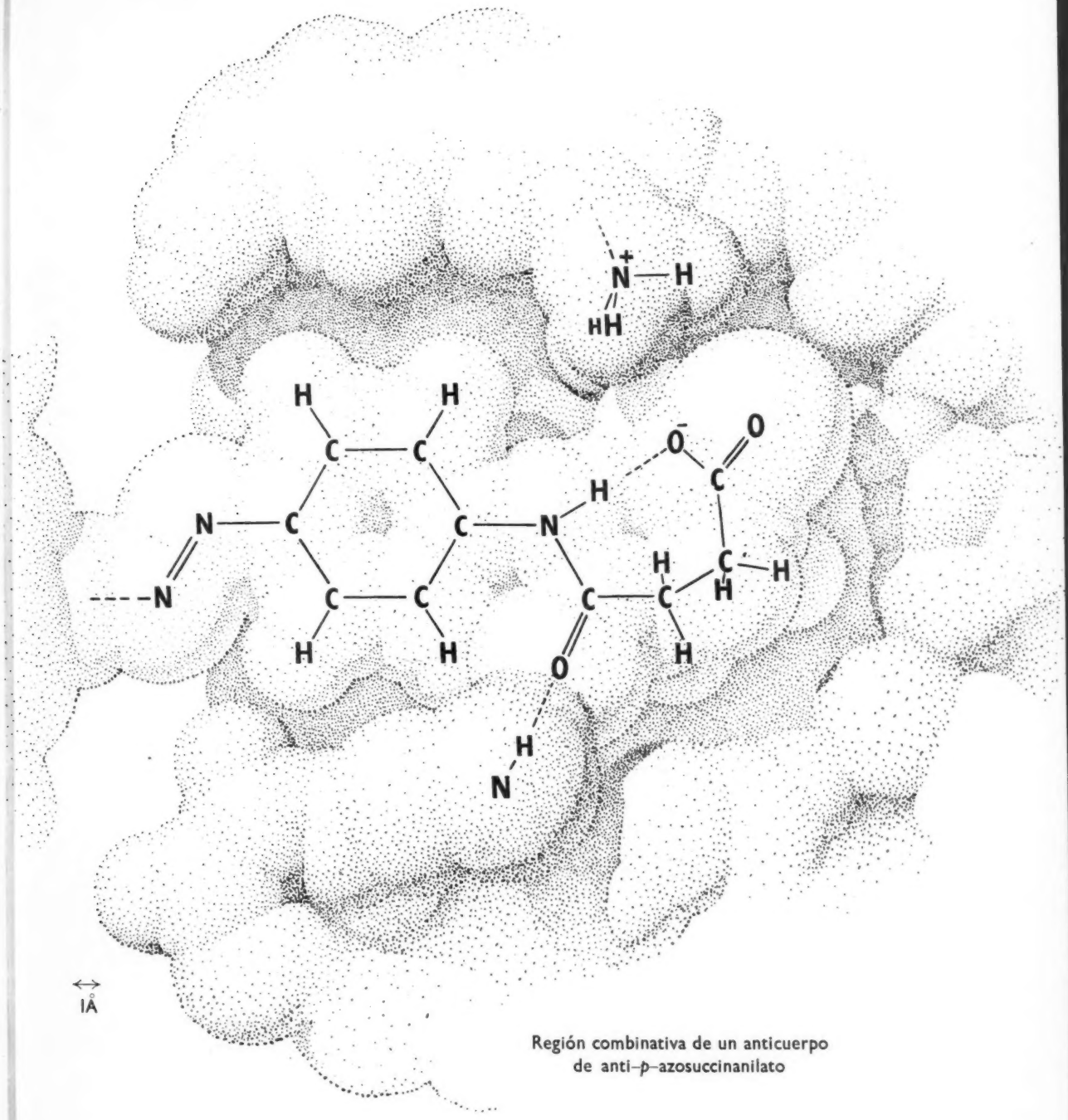


FIGURA 4 – *Un grupo hapténico y la región complementaria de su anticuerpo específico.*

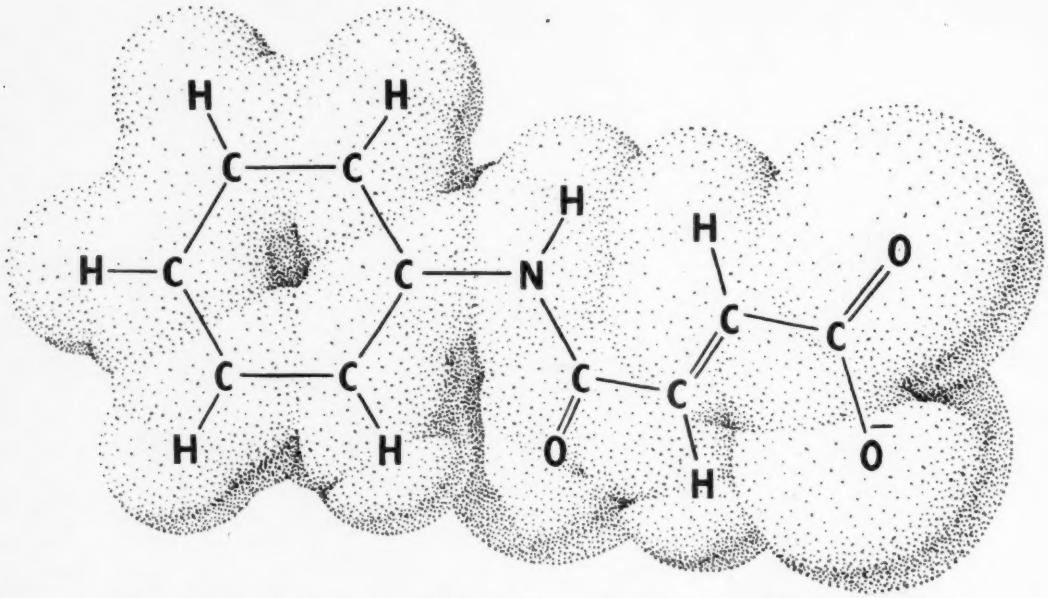


FIGURA 5 – *El ion de fumaranilato, que posee un poder combinativo muy reducido con el anticuerpo de la figura 4.*

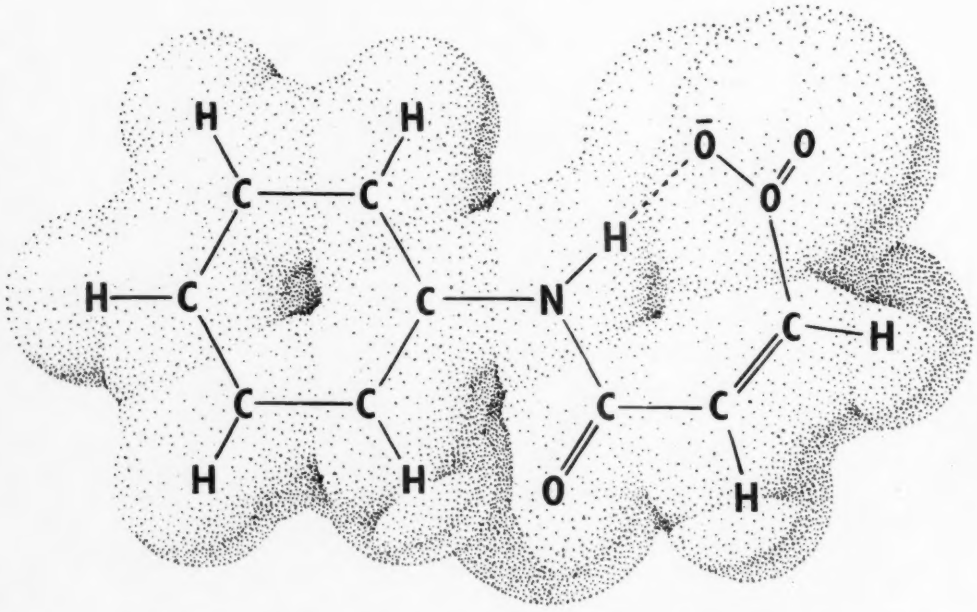


FIGURA 6 – *El ion de maleanilato, de gran poder combinativo con el anticuerpo de la figura 4.*

endurecimiento es el resultado de la operación de las fuerzas débiles entre las diferentes porciones de la cadena polipéptida que se hallan en yuxtaposición, fuerzas débiles que individualmente no podrían resistir el efecto disruptivo de la agitación térmica, pero que en cooperación, y una vez que la enorme molécula proteínica ha asumido su configuración final, mantienen a la molécula en dicha configuración.

En la figura 1 se representa la molécula antígena como un conglomerado de átomos de forma esférica aproximada, con una estructura superficial marcada por hoyos y protuberancias, una de las cuales puede representar, por ejemplo, un grupo hapténico de iones *p*-azobenzoato. El precursor de la globulina-γ se muestra sintetizándose en una región de la célula separada de la ocupada por el antígeno (dicha región va marcada por una línea de guiones). En la primera sección de la figura 1 vemos los dos terminales de una cadena polipéptida liberándose primero de dicha región y pudiendo plegarse en la configuración más estable de todas las que les son posibles; dichos terminales se ven en la segunda sección de la figura atraídos hacia la superficie del antígeno y asumiendo las configuraciones que incrementan lo más posible la fuerza de atracción entre ellos y la molécula antígena. Y como la mayoría de las fuerzas intermoleculares efectivas se debilitan rápidamente en razón directa de la distancia, siendo poderosas sólo a una distancia de muy pocos Å, las configuraciones estabilizadas de los terminales de la cadena polipéptida serán aquéllas que coloquen en inmediata yuxtaposición con la superficie de la molécula antígena la mayor porción posible de cada terminal. Esta complementaridad incluye no sólo la similaridad en la configuración superficial, sino también la yuxtaposición de grupos de combinación especiales, tal como los grupos de carga negativa del anticuerpo con los de carga positiva del antígeno, y un grupo de formación de enlaces hidrogénicos con un protón con un grupo similar con un par electrónico.

La tercera sección de la figura 1 muestra el antígeno con dos regiones de combinación del anticuerpo ya formadas. La sección central de la cadena polipéptida no se ha plegado todavía. En el cuarto dibujo, una de las regiones de combinación del anticuerpo se muestra separándose del antígeno, bajo la influencia de la agitación térmica; la sección central de la cadena se pliega entonces en su configuración estable, enlazando juntas a las dos regiones de combinación del anticuerpo formando la molécula completa. La cual aparece en la quinta sección enlazada aún al antígeno por medio de uno de sus grupos de combinación; en la sexta, aparece disociándose enteramente del antígeno bajo la influencia de la agitación térmica, y formando un anticuerpo libre que va a formar el volumen de titulación del plasma sanguíneo.

La suposición de que las moléculas anticuerpo poseen dos regiones de combinación con los antígenos (esto es: son bivalentes) explica ciertas propiedades de los antisueros. Por ejemplo, anticuerpos homólogos con antígenos celulares, tales como los corpúsculos rojos, pueden causar la aglutinación de dichas células. El suero de sangre humana de tipo B y O contiene anticuerpos capaces de combinarse con el antígeno A, que se halla presente en corpúsculos rojos de sangre de tipo A y AB. Cuando se añade dicho suero a una suspensión de tales células, éstas se aglutinan, lo que se explica mediante el uso por una de las moléculas anticuerpo de uno de sus grupos de combinación para unirse a la superficie externa de un corpúsculo combinándose con el grupo hapténico A presente en dicha célula, y luego, al chocar con otro corpúsculo, usa el segundo grupo de combinación para unirse a éste, manteniendo así juntas ambas células, proceso que puede continuar hasta que todas las células se hallen aglutinadas en coágulos. Una explicación semejante nos conduce inmediatamente a la comprensión del fenómeno de precipitación serológica, según indicó Marrack. La molécula antígena puede usar varias de sus porciones superficiales para unirse a diversas moléculas anticuerpo, como se indica en la figura 2, y cada una de estas últimas utiliza luego su segundo grupo combinativo para enlazar otras moléculas antígenas. Con la continuación de dicho proceso, los conglomerados de moléculas de ambas clases crecen en tamaño hasta que constituyen finalmente un precipitado visible. No se requiere, de este modo, otra explicación para el fenómeno de aglutinación y precipitación serológicas, una vez que el poder de formación de un enlace específico entre anticuerpo y antígeno queda aclarado, y se ha desarrollado un mecanismo de doble grupo de combinación en la molécula anticuerpo. No todos los antisueros poseen la facultad de precipitación serológica; los sueros no precipitantes contienen posiblemente anticuerpos univalentes con sólo un grupo combinativo.

Landsteiner descubrió un método de estudio de especial interés del grado de especifidad de los anticuerpos. Halló que cuando se añadía ácido

benzóico a un suero anti-*p*-aminobenzóico no se formaba un precipitado, aunque indudablemente se había producido una reacción entre los iones benzóicos y el anti-suero, ya que cuando se añadía la azoproteína homóloga a la solución no conseguía precipitarse con su anti-suero, que, sin la presencia del ion benzóico hubiera producido un precipitado. Dicha inhibición de precipitación mediante la presencia del ion benzóico hapténico fué explicada por Landsteiner como el resultado de la formación de un complejo soluble entre el anticuerpo y el ion benzóico. La teoría « reticular» de la precipitación serológica, y la postulada bivalencia de los anticuerpos nos suministra la inmediata explicación del fenómeno: el anticuerpo bivalente puede combinarse con dos moléculas de ion benzóico, una de las cuales se une a cada uno de sus grupos combinativos, pero no es capaz de formar un precipitado reticular con el ion benzóico debido a que éste (« antígeno») tiene sólo poder para combinarse con una molécula anticuerpo. El antígeno azoproteínico, con diversos grupos hapténicos de iones *p*-azobenzóicos, puede formar dicho retículo en ausencia del ion benzóico, pero en presencia del mismo todo el anticuerpo se halla combinado en complejos solubles con dicho ion, impidiéndose así la precipitación.

Continuando el trabajo de Landsteiner, el Profesor Dan H. Campbell, el Dr. David Pressman y el autor de este artículo, con otros colaboradores hemos llevado a cabo estudios cuantitativos del poder inhibitorio de un gran número de haptenos, habiendo obtenido detallada información acerca de la exactitud de encaje de la región combinativa del anticuerpo con los grupos hapténicos de estructura conocida. Se ha hallado que, en general, la substitución de un grupo por otro que difiere en forma en una o dos unidades de Ångström conduce a una disminución significativa del poder de combinación con el anticuerpo. Por ejemplo, la introducción de un grupo metil en lugar de un átomo meta-hidrógeno en el anillo de benceno de un ion benzénico disminuye su poder de combinación con un suero ácido anti-*p*-aminobenzóico hasta un décimo de su valor primero. Esta disminución se explica como el resultado de la dificultad de encajar el grupo metil, que tiene un radio efectivo de 2,0 Å, en la región que en el proceso de síntesis del anticuerpo estaba ocupada por un átomo de hidrógeno del grupo hapténico del antígeno inmunizante, con un radio efectivo de unos 1,2 Å. Se ha mostrado asimismo que un grupo de carga negativa se halla presente en el anticuerpo casi a la misma distancia mínima de proximidad a un grupo de carga positiva en el grupo hapténico de una azoproteína usada para la producción del anti-suero [7].

Un ejemplo de la importancia del efecto de la forma molecular sobre el poder combinativo con un anticuerpo aparece ilustrado en las figuras 3 a 6. La figura 3 representa el grupo iónico *p*-azosuccinanilato, presente con otros grupos similares en una molécula de azoproteína utilizada como inyección para producir en un conejo un anti-suero anti-*p*-azosuccinanilato. La figura 4 es un diseño esquemático de las regiones de combinación de dicho anti-suero, rodeando el grupo hapténico; se observará que los átomos que constituyen la superficie de la región combinativa del anticuerpo aparecen en contacto aproximado con la superficie de los átomos del grupo hapténico, aproximación indicada como de 1 Å. Parece probable que existe aún una mayor aproximación en muchos casos, y que el anticuerpo tiene suficiente elasticidad para permitir la introducción de haptenos cuya forma difiere en 1 o 2 Å en dimensión lineal de la del grupo hapténico del antígeno inmunizante. Un grupo iónico amónico, con carga positiva, aparece en el diseño a la mínima distancia de aproximación respecto del grupo carboxilo de carga negativa del hapteno succinanilato, y un grupo $>NH$, capaz de formar un enlace hidrogénico con el grupo carbonil del succinanilato se ve en la posición precisa para formar dicho enlace hidrogénico.

El ion maleanilato:

$$C_6H_5.NH.CO.CH=CH.COO^-$$

y el ion fumaranilato (con idéntica fórmula) son substancias de estrecha semejanza que difieren únicamente en su configuración espacial, ya que el primero presenta una configuración *cis* hacia el enlace doble de carbono–carbono, mientras que el fumaranilato tiene la configuración *trans* en el mismo lugar. Se descubrió que dichos iones difieren considerablemente en su poder inhibitorio respecto del suero anti-*p*-azosuccinanilato. El ion maleanilato tiene un poder inhibitorio casi tan grande como el del ion hapténico succinanilato homólogo mismo, mientras que el furmaranilato posee sólo un 1% del poder del maleanilato. Dicha facultad del anticuerpo de distinguir entre dos iones de estructura tan estrechamente relacionada fué descubierto por Landsteiner y ha sido verificado mediante el estudio de la inhibición hapténica de centenares de substancias. La escasa

diferencia en la estructura de ambos iones aparece representada en las figuras 5 y 6.

La importancia de la carga positiva del anticuerpo queda indicada por el hecho de que ningún hapteno, excepto los que poseen un grupo negativo — bien sea un grupo iónico carboxilo u otro grupo iónico muy similar — tiene poder combinativo con anticuerpos homólogos respecto del ion *p*-azosuccinanilato. La presencia del grupo de enlace hidrogénico ya indicado en la molécula anticuerpo, mostrado en combinación con el grupo carbonil, queda averiguada por el hecho de que sólo los haptenos que contienen este grupo carbonil tienen un significativo poder de combinación con el anticuerpo.

Es interesante indicar que se puede utilizar un estudio de las reacciones serológicas para suministrar datos acerca de la estructura y configuración moleculares de substancias simples [8]. Se podría suponer, por ejemplo, que el grupo iónico *p*-azosuccinanilato indicado en la figura 3 tiene una extensa configuración, algo parecida a la del ion fumaranilato, ya que existe considerable libertad de rotación cerca del enlace carbono–carbono; sin embargo, del hecho de que el ion maleanilato tiene un gran poder combinativo con los anticuerpos de iones anti-*p*-azosuccinanilatos, mientras que el ion fumaranilato lo tiene muy pequeño, se deduce que dichos anticuerpos poseen una configuración complementaria a la del ion maleanilato, y que, por consecuencia, el grupo iónico *p*-azosuccinanilato, que sirve de plantilla para la producción de dichos anticuerpos, tiene una configuración muy similar a la del ion maleanilato. Dicha configuración (figura 3) está al parecer estabilizada, con relación a la configuración *trans*, mediante la formación de un enlace hidrogénico N—H . . . O entre el grupo imino y un oxígeno del grupo carboxilo. El hecho de que el ion succinanilato, otras amidas del ácido succínico, y los esteres mono-alquiles del ácido succínico se combinan también con gran fuerza con el anti-suero prueba que dichos iones tienden asimismo a asumir una configuración *cis*. Sin embargo, el ion succinato ($^{-}OOC.CH_2.CH_2.COO^{-}$) nos presenta un reducido poder de combinación con el anti-suero — aproximadamente el mismo que el del ion fumarato — de donde se puede inferir que el ion succinato tiene esencialmente una configuración *trans* con respecto del enlace simple carbono–carbono. La evidente explicación de la estabilidad de la configuración *trans* de este ion nos la da la repulsión de Coulomb entre los dos grupos carboxilos de carga negativa.

La existencia de anticuerpos bivalentes puede explicarse quizás mediante su utilidad como causantes de la aglutinación de las células y de la precipitación de las moléculas antígenas. Sin embargo, desconocemos la razón de la utilidad de dichos fenómenos para los animales, o la razón por la cual sirven de protección contra las enfermedades. La lisis y la fagocitosis de las células va ayudada mediante la adición de anticuerpos a las mismas, pero no parece requerir su aglutinación; de aquí que esta parte del mecanismo de protección contra la infección pudiera llevarse a cabo lo mismo por medio de anticuerpos univalentes y bivalentes. Del mismo modo, la neutralización de las toxinas se obtiene efectivamente por medio de anti-toxinas univalentes, y la producción en el organismo animal de substancias bivalentes no está bien aclarada.

Con todo, los fenómenos de aglutinación y precipitación serológicas son muy curiosos, y será interesante observar si pueden explicarse satisfactoriamente a base de las mismas fuerzas que producen la combinación específica de anticuerpo y antígeno, o si es necesario acudir a alguna explicación adicional. Al sugerir que la primera de tales alternativas es la correcta, y que la aglutinación y precipitación son efecto de la multivalencia del anticuerpo, Marrack [6] adujo diversos experimentos y observaciones en apoyo de dicha opinión, que fué sostenida posteriormente por las investigaciones de Heidelberger y Kendall [9].

Recientemente se llevó a cabo un experimento de gran valor cuyos resultados no dejan lugar a duda de que la teoría reticular de la precipitación y aglutinación serológicas es correcta [10]. Landsteiner y van der Scheer [11] habían observado que ciertas substancias simples que contienen dos grupos hapténicos podían producir precipitados con los anti-sueros hapténicos homólogos. Nos pareció por lo tanto probable que la formación de un precipitado con dichas substancias que contenían dos grupos hapténicos, y la imposibilidad de formarlos con substancias que contienen sólo uno de dichos grupos, que en general únicamente tienen un poder inhibitorio, debido a la formación de complejos solubles, podía explicarse directamente por medio de la teoría reticular, y que era posible, por lo tanto, llevar a cabo una prueba de dicha teoría investigando un gran número de substancias monohapténicas y polihapténicas. Se realizó este trabajo con el uso de anti-sueros homólogos al grupo iónico *p*-azobencenoarsonato [12], hallándose que las substancias que contenían dos o más de dichos grupos

iónicos en la molécula producían precipitados con los anti-sueros, en total unas veinte substancias, mientras que las treinta substancias que contenían sólo un grupo iónico no formaban precipitados, sino más bien inhibían la formación de los mismos con un antígeno precipitante.

Podía argüirse, sin embargo, que la tendencia de las moléculas polihapténicas a formar precipitados con los anti-sueros se debe a otra propiedad distinta de su carácter poli-hapténico y que sólo uno de los grupos hapténicos puede intervenir en la combinación con el anticuerpo. Para probar dicha hipótesis se llevó a cabo un experimento especial [10] cuyos resultados mostraron que ambos grupos hapténicos en una substancia dihapténica entran en combinación específica con el anticuerpo en la formación del precipitado serológico.

Dos anti-sueros tomados de conejos distintos que, en combinación con una substancia sintética de tal naturaleza que ninguno de los anti-sueros podía por si sólo formar un precipitado con ella, pero que mezclados tenían la facultad de formarlo, fueron utilizados en una reacción serológica en que una substancia de estructura conocida sirve de antígeno precipitante con los dos anti-sueros distintos que deben cooperar para producir dicho precipitado.

Uno de los conejos recibió inyecciones de una azoproteína que contenía grupos R (grupos iónicos *p*-azobencenoarsonato), y el otro con otra proteína con grupos X (iones *p*-azobenzoato). Ambos anti-sueros son respectivamente suero anti-R y suero anti-X, ambos capaces de formar precipitados con substancias que contienen dos o más grupos hapténicos homólogos. Las dos substancias RX utilizadas en el experimento fueron obtenidos enlazando un grupo R y otro X a una molécula de estructura conocida — las substancias eran: ácido 1-amino-2-*p*-(*p*-azobencenoazo)-bencenoarsónico-3,6-disulfónico-7-*p*-(*p*-azobencenoazo)-benzóico-8-hidroxilnaftaleno y ácido 1,8-dihidroxi-2-*p*-azobencenoarsónico-3,6-disulfónico-7-*p*-(*p*-azobencenoazo)-benzóico-naftaleno. Se halló que cada una de dichas substancias no formaban precipitado, o sólo uno muy ligero, con los sueros anti-X o anti-R separados, pero un precipitado muy intenso con una mezcla de ambos. Esta observación parece probar que la precipitación del anticuerpo y el antígeno involucra ambos grupos hapténicos del antígeno dihapténico. Una substancia RX mezclada con suero anti-R usa sus grupos R para combinarse con los anticuerpos anti-R, y de este modo dos moléculas de RX forman un complejo soluble con una molécula de anticuerpo bivalente, no pudiendo formarse un precipitado debido a que las moléculas RX son efectivamente monohapténicas cuando se halla presente sólo anticuerpos anti-R. En presencia de una mezcla de anticuerpos anti-R y anti-X, la molécula RX es efectivamente bivalente y puede formar un retículo en el que alternan los anticuerpos anti-R y anti-X.

Poseemos ahora pruebas suficientemente convincentes de que la especificidad del poder combinativo de los anticuerpos puede explicarse en términos de fuerzas de corto alcance y naturaleza conocida, resultando dicha especificidad de la complementaridad reticular de la región combinativa del anticuerpo y la superficie del antígeno homólogo; no es preciso por lo tanto acudir a ciertas fuerza biológicas especiales de naturaleza desconocida que expliquen los fenómenos serológicos. Y no parece improbable que la especificidad biológica en general pueda explicarse de manera semejante, como resultado de las fuerzas no-específicas de corto alcance que actúan entre todas las moléculas, siendo la especificidad de las fuerzas de los sistemas biológicos debida a la compleja configuración superficial de las extensas moléculas contenidas en dichos sistemas, aunque los datos que poseemos respecto a los otros sistemas biológicos, aparte de los serológicos, no son muy copiosos. Fenómenos tales como la competencia entre las sulfonamidas y el ácido *p*-aminobenzóico, y la general inhibición de los sistemas enzímicos por substancias relacionadas estructuralmente con las que toman parte en la reacción catalizada, sugieren por su similaridad con la inhibición hapténica de la precipitación serológica la posibilidad de la acción de idénticas fuerzas que en los sistemas serológicos. Por ejemplo, el ion malonato sirve para inhibir la actividad catalítica de la enzima deshidrosuccinasa, al parecer debido a la competencia con el ion succinato por la posición de enlace con la región activa de la enzima. El hecho de que el ion malonato sea especialmente efectivo como inhibidor de dicha catálisis puede tener gran significado en relación con el mecanismo de la actividad catalítica. Si la región catalíticamente activa de la enzima fuese estrechamente complementaria en estructura con el ion succinato es de presumir que no acelerase la reacción de deshidrogenización del ion succinato, sino por el contrario que la retardase, ya que al combinarse con dicho ion lo estabilizaría, incrementando así la cantidad de energía necesaria para convertirlo

en el complejo activado previo a la reacción de deshidrogenización. Por el contrario, si la enzima se hallase más estrechamente relacionada estructuralmente con el complejo activado mismo que con el ion succinato, disminuiría la energía de activación necesaria para la reacción, apresurando a ésta de este modo. La efectividad inhibidora del ion malonato indica que dicho ion es más semejante en estructura al complejo activado de la reacción de deshidrogenización del ion succinato que lo es este último, y debido a ello el ion malonato puede competir efectivamente con el ion succinato por la posición de la región activa de la enzima.

Parece improbable que las diferencias específicas entre las enzimas estrechamente relacionadas producidas por animales de diferentes especies, o entre otras proteínas, tales como la hemoglobina, sean debidas a una diferencia estructural tan simple como lo es la diferente manera de enroscarse las cadenas polipéptidas. Es probable que los anticuerpos sean los únicos que usen este sistema para el establecimiento de diferencias específicas y que otras macromoléculas biológicas dependan de cambios estructurales más profundos para producir tales diferencias en sus propiedades específicas. Concretamente: creemos que, en general, es probable que las mutaciones no se deban simplemente a un cambio del modo de enroscamiento del núcleo de estructura filamentosa, o nucleoproteína, que forma el gene, sino más bien a un cambio en la composición de dicho núcleo, el cual tiene la facultad de alterar su actividad catalítica permitiéndole la producción controlada de dobles de sí mismo que contienen dicho cambio estructural. Parece probable que un gene que haya sido dañado por la luz ultravioleta, o por los Rayos X, o por cualquier otra catástrofe genética, en tal manera que produce un mutante, no sea en sí mismo un gene mutado, sino meramente un gene dañado; y si el daño fuese mortal, entonces le sería imposible llevar a cabo la esencial función que le pertenece en el desarrollo del organismo. Puede ser también que el daño sea de tal naturaleza que permita al gene actuar de plantilla y realizar sus demás funciones, produciendo copias de sí mismo como era antes de sufrir el daño. Stanley descubrió que las moléculas del virus del mosaico del tabaco, tratadas químicamente con objeto de alterar la naturaleza de un gran número de grupos, podían infectar a una planta, pero su progenie era idéntica a las moléculas del virus original antes de sufrir la alteración química. Podía también ser que el gene dañado continuase sus funciones y produjese nuevos genes de estructura un tanto alterada, los cuales servían entonces de plantillas, hasta obtenerse finalmente un estado estable en el que no hubiese diferencia entre el gene que servía de plantilla y el gene producido según su modelo. Tal sería el fenómeno de la mutación.

Poseemos en la actualidad muy pocas pruebas seguras acerca de la naturaleza detallada de los procesos de producción de réplicas de las complejas moléculas biológicas, tales como los virus y los genes, pero es evidente que el fenómeno de producción de estructuras complementarias, como la formación de anticuerpos, nos ofrece un posible procedimiento. La producción de una réplica, por ejemplo, puede necesitar un intermediario: el gene produciría entonces una molécula complementaria en estructura consigo mismo, y ésta, a su vez, serviría de plantilla para la reproducción de una réplica del gene original. La existencia probada de ciertas substancias complementarias en los organismos vivos, tales como los antígenos de los grupos sanguíneos y sus aglutininas homólogas, y las substancias mútuamente complementarias halladas en el huevo y el esperma, parecen ofrecer una base a esta teoría.

BIBLIOGRAFIA

[1] LANDSTEINER, K. *The Specificity of Serological Reactions* (Charles C. Thomas, Springfield, Ill., 1936).

[2] PAULING, L. *J. Am. Chem. Soc.*, **62**, 2643 (1940).

[3] BREINL, S., y HAUROWITZ, F. *Zeit. physiol. Chem.*, **192**, 45 (1930).

[4] ALEXANDER, J. *J. Protoplasma*, **14**, 296 (1931).

[5] MUDD, STUART. *J. Immunol.*, **23**, 423 (1932).

[6] MARRACK, J. R. «The Chemistry of Antigens and Antibodies», Report No. 230 del Medical Research Council (2ª ed., 1938) (H.M. Stationery Office, Londres, 1934).

[7] PRESSMAN, D., GROSSBERG, A. L., PENCE, L. H., y PAULING, L. *J. Am. Chem. Soc.*, **68**, 250 (1946).

[8] PRESSMAN, D., BRYDEN, J., y PAULING, L. *J. Am. Chem. Soc.* (de próxima aparición).

[9] HEIDELBERGER, M., y KENDALL, F. E. *J. Exp. Med.*, **61**, 559, 563; **62**, 467, 697 (1935).

[10] PAULING, L., PRESSMAN, D., y CAMPBELL, D. H. *J. Am. Chem. Soc.*, **66**, 330 (1944).

[11] LANDSTEINER, K., y VAN DER SCHEER, J. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, **29**, 747 (1932).

[12] PAULING, L., PRESSMAN, D., CAMPBELL, D. H., y colaboradores. *J. Am. Chem. Soc.*, **64**, 2994, 3015 (1942); **65**, 728 (1943).

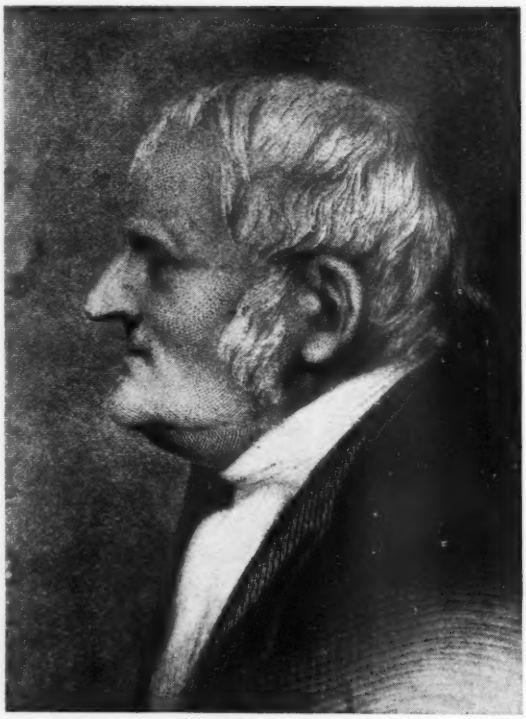
[13] TYLER, A. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **25**, 317 (1939); **26**, 249 (1940); *Growth*, **10** (suplemento), 7 (1947).

John Dalton

J. R. PARTINGTON

La opinión de que la materia se compone de átomos ha sido discutida por los filósofos desde la época de Empédocles. La gran contribución de John Dalton al progreso de la ciencia estriba en la precisa formulación de una teoría atómica y su aplicación a los problemas químicos. Dicha teoría le permitió explicar todas las leyes de las combinaciones químicas hasta entonces conocidas, siendo un gran tributo a su genio el que, aunque modificada y extendida señaladamente, su teoría atómica es aún la base de toda la química moderna.

John Dalton nació en Eaglesfield, aldea de las cercanías de Cockermouth, en Cumberland, lejos de todo centro de comercio y enseñanza. Sus padres y antepasados eran artesanos, no campesinos, y aunque aquéllos vivían en modestas circunstancias poseían sin embargo una pequeña fortuna: eran « gentes de hacienda » según la parla local. Pertenecían asimismo a la *Society of Friends*, secta cuáquera a la que había de pertenecer John Dalton toda su vida, y por lo tanto no existe nota de su nacimiento en los archivos parroquiales, aunque la fecha (6 septiembre 1766) quedó durante mucho tiempo en la memoria de algunos vecinos de los padres. Su padre, tejedor de lana, le enseñó aritmética; a la edad de 10 años recibía lecciones en matemáticas de Elihu Robinson, rico cuáquero de algún talento científico, acudiendo también a la escuela, donde se le consideraba serio y perseverante, pero no talentoso. Estableció, a la edad de 12 años, él mismo, una escuela, pero no podía hacerse respetar por otros muchachos mayores y de más edad que él. En 1781 fué, con su hermano, de asistente a una escuela de la ciudad de Kendal, de la cual se hicieron cargo en 1785, y en ella enseñaban Griego, Latín, Francés, y Matemáticas además de otras materias en inglés; John había aprendido las lenguas y las matemáticas tras dura labor en la que le animaba John Gough, un cuáquero ciego de gran entendimiento. Durante el invierno de 1787 y 1791 dió cursos de conferencias de filosofía natural en la que se incluía la química; sus conocimientos de dicha ciencia se derivaban de las obras de Boerhaave y Boyle, y los *Essays* del obispo Watson, habiendo también estudiado durante su estancia en Kendal, con toda probabilidad, en compañía de Gough, los *Principia* de Newton. Recomendado por Gough le nombraron profesor de Matemáticas y Filosofía natural en el *New College* de Manchester. Enseñó también allí química, usando el texto de dicha ciencia de Lavoisier. En Manchester permaneció Dalton durante el resto su vida. Publicó en 1801 su *Elements of English Grammar; or a New System of Grammatical Instruction*, y su segunda edición en 1803. En 1824 pronunció algunas conferencias para los estudiantes de medicina.



John Dalton, 1766–1844.

En 1792 Dalton descubrió que sufría un especial defecto de visión — daltonismo, o ceguera para ciertos colores — publicándose dicho descubrimiento en 1794. En 1794 se inscribió en la Sociedad Literaria y Filosófica de Manchester, de

la que fué Vice-presidente en 1808, y Presidente de 1817 a 1844, y a la que leyó más de un centenar de estudios. En un local de la Sociedad se conservaban numerosas memorias de Dalton hasta ser destruído por un siniestro causado por las bombas incendiarias alemanas en 1940. Dalton gozaba de excelente salud, hasta los últimos años de su vida, y era un formidable escalador de montañas que dejaba siempre atrás a sus camaradas de excursión. Siempre soltero, decía que no tenía tiempo para casarse, pero le gustaba la compañía de mujeres cultas. Aunque era conferenciante muy popular, su estilo era un poco basto, su voz ronca y profunda, y en cierta ocasión causó enojo en su público por referirse a los elementos químicos con el término « artículos » como si fuese un tendero y no un « filosófo natural ». Como experimentador le faltaba exactitud; sus aparatos consistían de tinteros de un penique, trozos de cañerías, etc., que hoy parecerían despreciables, pero con los que consiguió resultados que no se apartaban mucho de la verdad. Mostró una extraordinaria habilidad en el análisis gaseoso.

Antes de ser bien conocido, Dalton pronunció unas conferencias en la *Royal Institution* de Londres en 1803–4 y 1809–10, a invitación de Davy, quien le instruyó en el arte de la oratoria. Cuando habló en Edimburgo su público fué muy escaso, pero en Glasgow, en 1807, tuvo un gran recibimiento. En 1822 fué elegido miembro de la *Royal Society*, recibiendo la Medalla Real en 1826; en 1830 fué nombrado uno de los ocho socios extranjeros de la Academia Francesa, y recibió un título honorífico en la Universidad de Oxford en 1834. El año antes, el Gobierno británico le otorgó una pensión civil que, en 1836, ascendía a la cantidad de 300 libras anuales. El 27 de julio de 1844 falleció de un ataque, recibiendo un imponente funeral público.

Desde muy temprano Dalton escribió un diario meteorológico en el que anotó diariamente, hasta la mañana de su muerte, datos sobre el tiempo, y en su última entrada se lee « llovió poco este . . . » y en letra más vacilante « día », con lo que acaba su vida de observaciones científicas. Su obra *Meteorological Observations and Essays*, publicada en 1793, con una segunda edición en 1834, contiene los gérmenes de sus descubrimientos posteriores, que parecen haber comenzado con un estudio del estado del vapor de agua en la atmósfera. Newton, en sus *Principia*, había adoptado la idea de que la presión atmosférica era debida a la repulsión de las partículas por una fuerza que variaba en razón inversa a la distancia. La teoría cinética ofrecida por Bernoulli (1737) de que era debida al bombardeo de partículas móviles no fué aceptada. Pero la teoría atómica, desde su primera enunciación en la antigua Grecia, había permanecido siempre en estado latente, y Newton, en su *Opticks* había hecho gran uso de ella, pareciendo haber llegado a sospechar que los distintos átomos pueden tener masas diferentes, y no cabe duda de que suponía que tenían tamaño y forma distintos; en cuanto a su divisibilidad afirmó que sólo se podía dilucidar mediante la experimentación.

Lavoisier había usado la idea de los átomos, y en su *Elementos de Quimica* (1789) afirmó que un gas consiste de pequeñas partículas entre las que se hallan otras partículas, o « moléculas », del flúido del calor (calórico) cuya repulsión mantiene aparte a las moléculas gaseosas causándose así la presión del gas. Mostró también que la atmósfera se compone de dos gases, oxígeno y nitrógeno, y de vapor de agua, mientras que Newton había supuesto que el aire contiene sólo una clase de partículas. Otros pensaban que la atmósfera era un compuesto químico, lo que explicaba la constancia de su constitución y el hecho de que el oxígeno, de más peso, no se separase del nitrógeno, sin decidirse definitivamente sobre el estado del vapor acuoso. Y fué precisamente el prolongado y persistente estudio del problema de la constitución atmosférica lo que condujo a Dalton al establecimiento de la teoría atómica química.

En 1793, en sus *Meteorological Observations and Essays*, afirmaba que « el aire puro es una mezcla íntima de varios flúidos elásticos, o gases », y que « si adoptamos la opinión, que a mí me parece más probable, de que el agua evaporada no está químicamente combinada con los flúidos aéreos, sino que existe como un flúido especial difuso entre los demás », era entonces posible explicar con facilidad los fenómenos de la lluvia y el rocío. Un trabajo publicado en el *Nicholson's Journal* en 1801, « Nueva teoría sobre la constitución de los flúidos aeriformes mixtos, y en especial de la atmósfera », extendido más tarde en cuatro ensayos leídos ante la Sociedad Literaria y Filosófica de Manchester, dió a Dalton una reputación europea; en él se contenía su « Ley de los gases mixtos », o ley de presiones parciales que, según él mismo afirma en su *New System* (1808) « se tropezó con ella » en el otoño de 1801. Dicha ley equivalía a la suposición de que, según dijo Henry en 1804, « en una mezcla de gases, cada gas actúa como un vacío respecto de los demás »; y al

investigar la posibilidad de acoplar dicha hipótesis con la repulsión mutua de las partículas de los diferentes gases, Dalton parece haber llegado a la conclusión de que las partículas de los diferentes gases poseen pesos distintos. Hizo gran uso de diagramas, algunos de ellos reproducidos en su libro, mostrando las « partículas finales » de los gases como pequeñas esferas, rodeadas por una atmósfera de calórico. También usó en sus conferencias cubos de madera que representaban los átomos, de donde se deduce la famosa definición de los átomos, dada por un estudiante, de que « son pequeños tarugos pintados de colores, inventados por el Dr. Dalton ». También usaba esferas de madera con unos agujeros que servían para unirlas con unas varillas.

La anotación primera de Dalton de una tabla de pesos atómicos lleva la fecha del 6 septiembre 1803, y sus valores (hidrógeno 1, oxígeno 5,66, nitrógeno 4, carbono 4,5, etc.) se basan principalmente en los análisis de Lavoisier. Su primera notificación sobre tal estudio de halla al final de un trabajo presentado a la Sociedad Literaria y Filosófica el 12 noviembre 1802, pero impreso por vez primera en 1805, dando noticia de algunos experimentos sobre la mezcla de aire y óxido nítrico sobre agua; experimentos que aparecen indicados en su libro de apuntes en el período de octubre-noviembre de 1803. Sirvieron para mostrar que « el oxígeno puede combinarse con una cierta porción del gas nitroso, o con el doble de dicha porción, pero no con cantidades intermedias. » En una nota del trabajo publicado se lee: « La investigación del peso relativo de las partículas finales de los cuerpos es un estudio enteramente nuevo, que yo sepa; a él me he dedicado, obteniendo un resultado notable. El principio sobre el que se basa no puede ser tratado en este estudio, pero indico en él sus resultados, en lo que parecen ser comprobados por mis experimentos. » Sigue después « una tabla del peso relativo de las partículas finales de los gases y otros cuerpos », la primera tabla de pesos atómicos, en la que todos los valores (a excepción del patrón, hidrógeno = 1) son incorrectos.

En 1804 Thomas Thomson hizo una visita a Dalton en Manchester, y en 1807 dió la reseña más temprana de la teoría atómica de Dalton en el tercer volumen de la tercera edición de su *System of Chemistry*, ya que el primer volumen de la obra de Dalton *New System of Chemical Philosophy* no apareció hasta 1808, y en ella se contenía únicamente una breve sección de su teoría. En su *History of Chemistry* (1830–1), reseñó Thomson el origen de la teoría daltónica refiriéndolo al descubrimiento de las proporciones múltiples en sus análisis de los gases cenagosos y del etileno mediante explosión con oxígeno, pero la teoría existía ya un año antes, por lo menos, de que dichos análisis viniesen a confirmarla. Se derivó, en realidad, de sus elucubraciones sobre los gases mixtos, en las que era su objeto reconciliar la teoría newtoniana de la atmósfera (que suponía que ésta fuese un elemento) y los nuevos datos que probaban que se trataba de una mezcla de dos gases permanentes y de vapor de agua.

Los valores de los pesos atómicos dados por Dalton se basaban en ciertas reglas empíricas, la primera de las cuales era que si sólo se conoce un compuesto de dos elementos, su « átomo compuesto » contiene un átomo de cada elemento, « a menos que exista cierta causa en contrario »; idea que se basaba en la teoría de la repulsión de átomos de la misma especie. Se suponía que las partículas de oxígeno, nitrógeno, etc. eran átomos, y no moléculas compuestas de dos átomos. Dalton no aceptó la hipótesis de Avogadro y dudaba de la exactitud de la ley volumétrica de Gay-Lussac.

Aunque los símbolos circulares que usaba eran muy inconvenientes, Dalton nunca adoptó los de Berzelius (que se hallan todavía en uso) de los que llegó a afirmar que eran « horribles ». Su carácter conservador se muestra asimismo en su resistencia a aceptar las opiniones de Davy respecto a la composición de los alcalís, tierras y cloro. Con algunos trabajos rechazados por la *Royal Society* compuso un libro en 1840–2 en cuyo prefacio deja ver su resentimiento: en ellos se contienen algunas observaciones importantes que debieran haber sido publicadas. Hacia la misma fecha la *Royal Society* rechazaba también los trabajos de Joule.

La teoría atómica data de la época de los filósofos griegos, y ya con anterioridad a Dalton se habían realizado algunas aplicaciones de la misma a los problemas físicos. La importancia de la obra de éste estriba en su adaptación a la química mediante la atribución de diferentes pesos atómicos a los distintos elementos químicos, y la hipótesis de una proporción combinativa entre los átomos que hacía posible calcular los pesos atómicos relativos a base de la proporción combinativa de las masas. Tales resultados sirvieron para explicar inmediatamente todas las leyes conocidas de la combinación química; las extensiones posteriores de la teoría atómica de Dalton han ensanchado y profundizado su contenido, pero en sus líneas principales se conserva fundamentalmente como él la concibió.

El microscopio polarizador

B. K. JOHNSON

Aunque el microscopio polarizador se ha venido empleando durante muchos años en investigaciones geológicas y mineralógicas, su valor potencial en los campos metalúrgico, biológico y químico no ha sido propiamente apreciado. En el artículo siguiente se describen los principios fundamentales relativos al uso del microscopio polarizador, y se dan varios ejemplos de su aplicación a problemas prácticos, especialmente en estas nuevas esferas.

El empleo de la luz polarizada en conjunción con el microscopio ha extendido notablemente las aplicaciones de dicho instrumento a particulares ramas de la ciencia. Entre éstas, quizá corresponde el primer lugar a la Geología, ya que el trabajo original de Sorby se remonta a 1860. Desde entonces se han llevado a cabo valiosos trabajos con el microscopio polarizador y más recientemente ha hallado su aplicación en la biología y metalurgia.

Las imágenes que aparecen al examinar ciertos objetos con el microscopio polarizador son de gran ayuda para la identificación de los especímenes, cosa imposible de realizar con luz no polarizada. Por ejemplo, la identificación de diminutas partículas de cristales, minerales, etc., se consigue por dicho método; en el caso de muestras biológicas facilita la diferenciación de membranas fibrosas en otros tejidos; y pueden identificarse inclusiones en el seno de muestras metalúrgicas y observarse el efecto de las tensiones internas.

Antes de referirnos al instrumento en sí, queremos señalar algunos puntos generales sobre los fenómenos de polarización, sin entrar, no obstante, a fondo sobre la materia.

La producción de luz polarizada en un solo plano puede conseguirse por diferentes métodos ópticos, entre otros los siguientes:

1. Por reflexión sobre una superficie pulimentada con un ángulo apropiado.
2. Por transmisión a través de un prisma Nicol o una modificación del mismo.
3. Por transmisión a través de una placa de turmalina cortada paralelamente a su eje óptico.
4. Por transmisión a través de placas de « Polaroid » (un compuesto de yodo y sulfato de quinina que cristaliza en delgadas láminas planas).

Si se disponen en sucesión dos cualesquiera de dichos instrumentos anteriores orientándolos de tal manera que las respectivas direcciones de vibración de la luz transmitida sean paralelas, la luz llegará a su través hasta la vista del observador situado después del segundo polarizador (llamado a veces analizador). No obstante, si giramos uno de ellos hasta que su plano de vibración forme un ángulo recto con el de la luz transmitida por el otro, no llegará luz alguna al observador. Esta posición se designa por « Nicoles cruzados » y la primeramente indicada por « Nicoles paralelos ».

Si colocamos entre dos Nicoles cruzados ciertas substancias, tales como vidrio, cuarzo, celofán o selenita (sulfato de calcio) y las hacemos girar en su propio plano perpendicular a la dirección de la visión, veremos que se comportan de manera distinta respecto a la luz transmitida a medida que prosigue tal rotación. Así el vidrio (si es homogéneo y libre de tensiones internas) no produce efecto alguno sobre el campo oscuro de los Nicoles cruzados; en cambio el cuarzo aparece alternativamente oscuro y transparente cada 45° de rotación (figura 10*a* y *b*); la pieza de celofán (si es delgado y de un grosor uniforme) aparecerá coloreada; y una delgada placa de selenita (la cual, en general, se exfolía según placas de grosor diferente) aparecerá de múltiples colores al situarla a 45° entre los Nicoles cruzados. Tal efecto se ve en la figura 1.

Las apariencias ópticas de los tres últimos materiales son debidas a su poder de bi-refracción. La conocida propiedad de la doble refracción que poseen ciertos medios puede demostrarse por los experimentos de Huygens, con un cristal romboédrico de espato de Islandia (calcita) colocado sobre cualquier papel impreso, con lo que aparecen dos imágenes en vez de una sola (figura 12). Otro experimento (figura 13) consiste en observar una rendija iluminada, a través de un cuarzo pulido, lo que da lugar a dos espectros; si entonces colocamos sucesivamente el polarizador en cada uno de los haces, podremos observar que cada haz está

polarizado en un plano, pero ambos son mútuamente perpendiculares. Otra importante conclusión de este experimento es que debido a que ambos haces están distintamente desviados el índice de refracción del material para cada uno de ellos debe ser asimismo diferente; o sea que ambos haces poseen velocidades de propagación distintas en el seno del medio.

Esto permite explicar muchos fenómenos de polarización. Por ejemplo, el color de una placa paralela y delgada de una substancia bi-refringente colocada a 45° entre dos Nicoles cruzados e iluminada con luz blanca, es debido a que ambos haces, que se propagan con distintas velocidades a través de la placa, se defasan de media longitud de onda de un color del espectro; así esta coloración puede eliminarse por « interferencia » y la apariencia final de la substancia es el blanco menos la parte espectral eliminada.

Tales explicaciones no son, sin embargo, suficientes y tales fenómenos pueden sólo comprenderse mejor por un estudio a fondo de dichas cuestiones [1, 2, 3, 4].

Podremos apreciar cuan útil es el empleo de la luz polarizada para muchas investigaciones, comparando las microfotografías en color de las figuras 1, 2 y 3 con las correspondientes tomadas con luz no polarizada.

Refiriéndonos ahora a los requerimientos para convertir un microscopio ordinario en un microscopio polarizador, podemos indicar que en el caso de instrumentos sencillos basta emplear dos polarizadores, uno situado inmediatamente delante del condensador debajo de la platina y el otro convenientemente dispuesto sobre el ocular, que permita ser retirado a voluntad. Tanto el polarizador como el analizador pueden girar alrededor del eje del microscopio y lo mismo puede hacerse con la platina. Los instrumentos más complicados poseen dispositivos que permiten introducir ciertos efectos ópticos para determinados ensayos de las muestras. Por ejemplo, el tubo central del microscopio debe permitir la introducción, entre otros, de una cuña de retardo, una lámina onda y una lente de Bertrand, la finalidad de los cuales detallamos más adelante. Por lo tanto, el sistema óptico de un microscopio polarizador queda dispuesto como indica la figura 14. P es el polarizador (en general un prisma Nicol) situado inmediatamente debajo del condensador C y que puede girar alrededor de su eje vertical. S es la platina giratoria sobre la cual se coloca la muestra, O es el objetivo, E el ocular y A el analizador que puede consistir en un pequeño Nicol, una lámina de turmalina o una placa polaroid. Las partes a la derecha de la figura son algunos de los dispositivos auxiliares con indicación de sus posiciones correspondientes dentro del tubo.

MEDIDA DE LA BI-REFRINGENCIA

Una de las mediciones más importantes a realizar con el microscopio polarizador consiste en la determinación numérica de la bi-refringencia de una pequeña muestra, ya que en ello se basa generalmente su identificación.

La diferencia entre los índices de refracción ($N_1 - N_2$) del material para cada uno de los dos haces determina su bi-refringencia; y como existen tablas de las substancias en orden de su bi-refringencia[1] se facilita así su identificación.

Tal determinación se realiza midiendo el retardo R de un haz con respecto del otro a su paso a través de una placa de la substancia a estudiar y determinando su grosor t. La bi-refringencia ($N_1 - N_2$) es igual a R/t. La medida del retardo R se consigue por medio de un dispositivo óptico conocido con el nombre de cuña de retardo, el cual consiste en una cuña delgada de una substancia monoaxial bi-refringente (p.ej. cuarzo) cortada con sus caras paralelas a su eje óptico (figura 11). Colocando esta cuña entre dos Nicoles cruzados, situada a 45° respecto a la dirección de vibración del polarizador e iluminada con luz monocromática, aparecen unas bandas oscuras de interferencia situadas a lo largo de la cuña donde su grosor es tal que el retardo entre los dos haces vale media longitud de onda o un múltiplo impar de media longitud de onda de la luz monocromática empleada. Por ejemplo, la figura 5 muestra una cuña iluminada con luz roja monocromática ($\lambda = 6.200$ Å); podemos observar las bandas de interferencia y sus relativas posiciones sobre la escala.

Si se ilumina, no obstante, la cuña con luz blanca en vez de luz monocromática, aparecen entonces una serie de bandas coloreadas, cada color correspondiente a un retardo determinado. La figura 4 ilustra este « orden de colores de polarización ». Empezando con el negro, para un grosor nulo de la cuña, aparecen después tonos gris-azulados, seguidos de amarillo, naranja, rojo, etc., correspondientes a puntos de mayor retardo. Quincke ha realizado un estudio del orden de aparición de estos colores para retardos conocidos. Su tabla se da en la pág. 63.

Evidentemente, el color de una muestra observada bajo la luz polarizada es una indicación

[1] *Manual of Petrographic Methods*, p. 373, ref. 5.

EN
AE

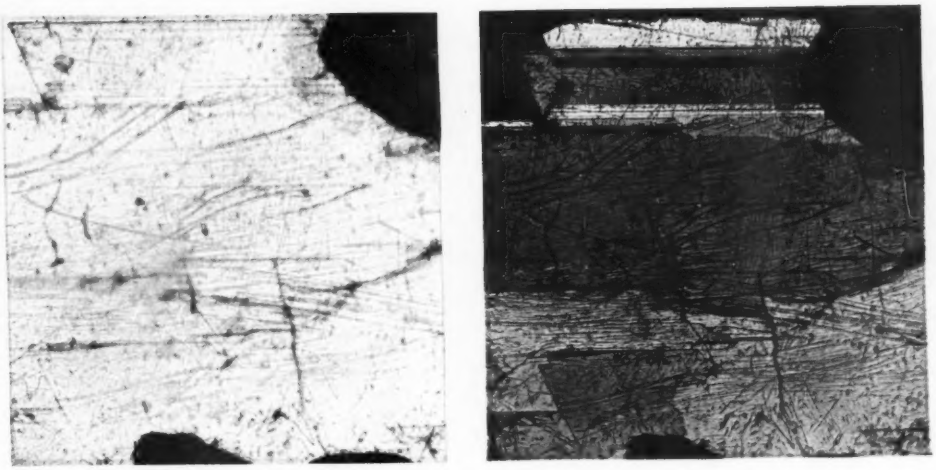


FIGURA 1 – *Una lámina de exfoliación de selenita vista bajo luz no polarizada (izquierda) y bajo luz polarizada (derecha).*

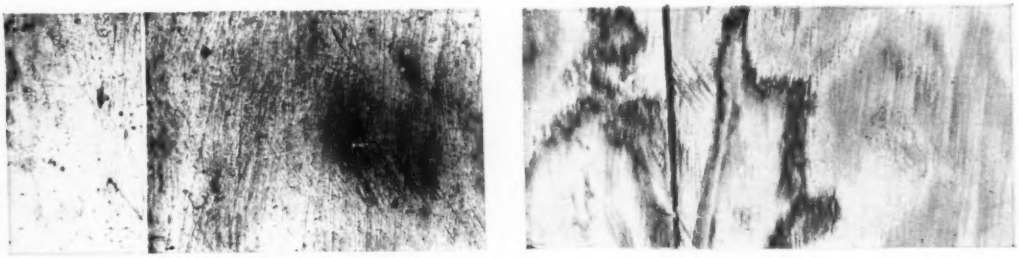


FIGURA 2 – *Fotomicrografías de una delgada sección de cuerno natural bajo luz no polarizada (izquierda) y bajo luz polarizada (derecha). Ambas vistas son de la misma zona de la muestra.*

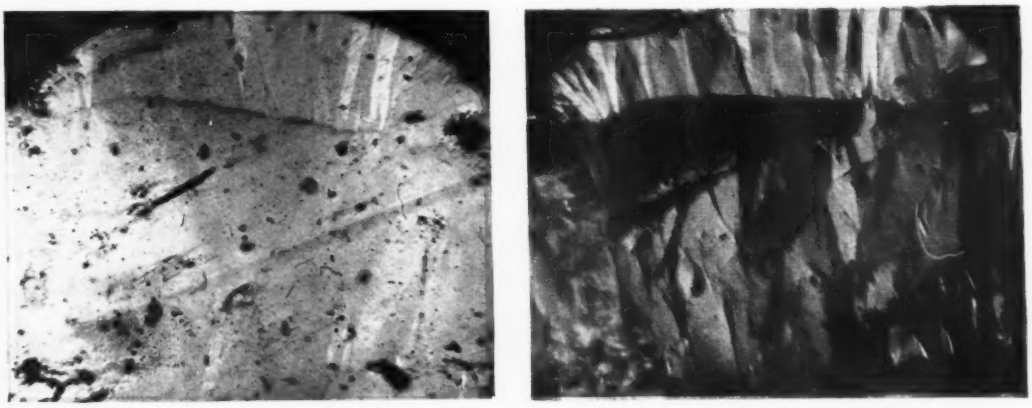


FIGURA 3 – *Fotomicrografías de un objeto opaco (sulfuro de cobre) tomadas con luz no polarizada (izquierda) y con luz polarizada (derecha). Ambas vistas corresponden a la misma parte del objeto.*

FIGURA 4 – *Orden de los colores de polarización. La escala calibrada superpuesta a los colores facilita la determinación del retardo del color (la escala que marca* 10 *corresponde a un retardo de* 1 *micrón).*

FIGURA 5 – *Franjas de interferencia al iluminar una cuña de retardo con luz monocromática.*

FIGURA 6 – *Medición del retardo al superponer la imágen de la muestra sobre la cuña.*

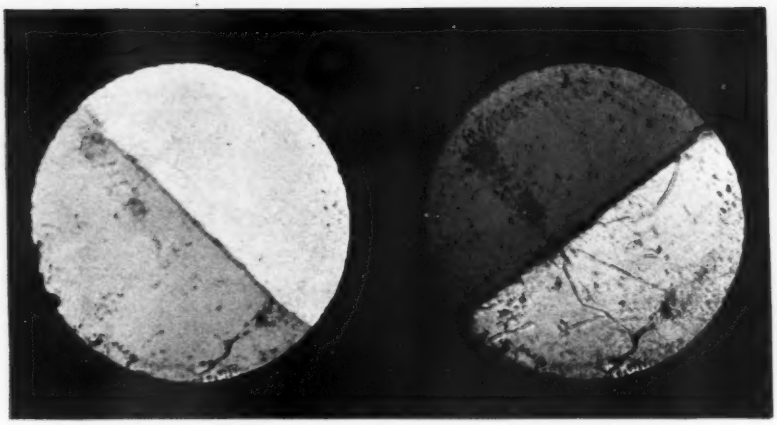


FIGURA 7 – *Medición del retardo por medio de una lámina onda.*

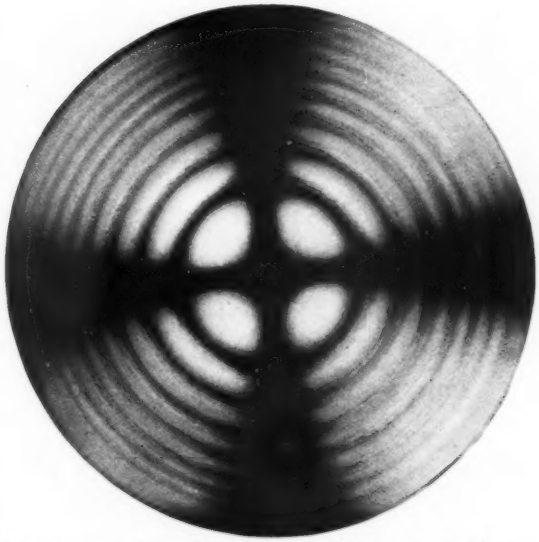


FIGURA 8 – *Aspecto característico de « anillo y escobilla » producido por un cristal monoaxial visto bajo luz polarizada « convergente ».*

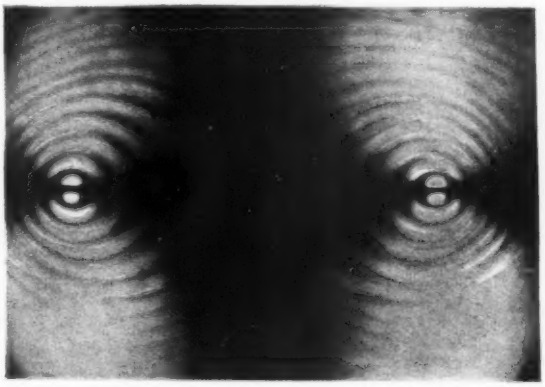


FIGURA 9 – *Figura de « dos ojos » producida por un cristal biaxial bajo luz polarizada « convergente ».*

FIGURA 10 – *Un pequeño cristal de cuarzo visto entre dos Nicoles cruzados (izquierda) al ser colocado paralelamente a la dirección de vibración del polarizador y (derecha) colocado a 45° con la dirección de vibración del polarizador.*

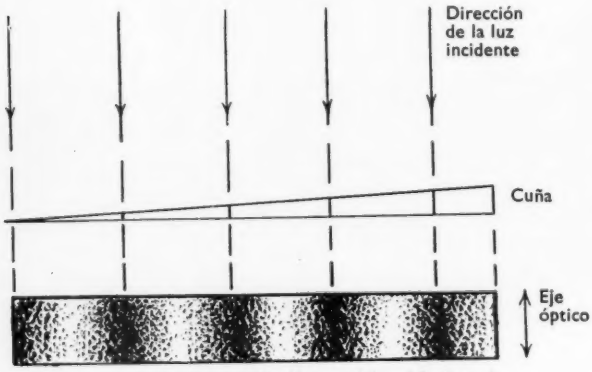


FIGURA 11 – *Representación diagramática del efecto de una cuña de un material de bi-refringencia monoaxial, como el cuarzo. Las bandas se forman cuando el grosor de la cuña es tal que el retardo entre dos haces es igual a media longitud de onda, o a un múltiplo impar de media longitud de onda.*

FIGURA 12 – *Doble refracción producida por un rombo de calcita.*

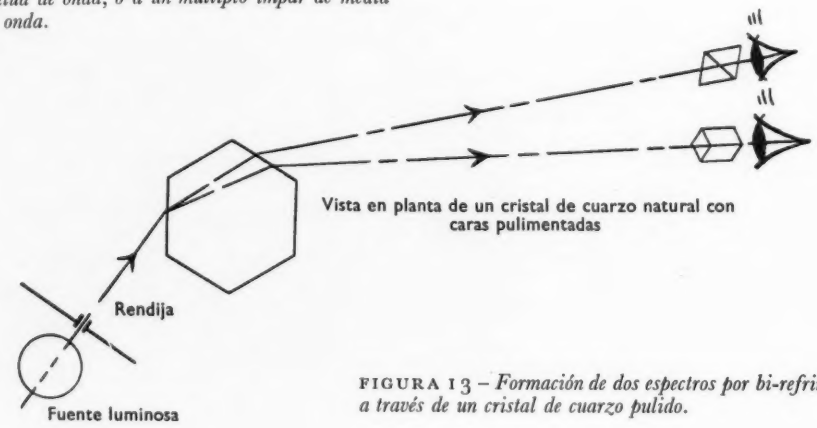


FIGURA 13 – *Formación de dos espectros por bi-refringencia a través de un cristal de cuarzo pulido.*

TABLA DE COLORES DE POLARIZACION

Retardo en Micrones para $\lambda = 5.893$ Å	*Colores de Interferencia entre Nicoles Cruzados*	*Orden*
0,00	Negro	PRIMERO
0,04	Gris acerado	
0,097	Gris alhucema	
0,158	Azul agrisado	
0,218	Gris claro	
0,234	Blanco verdoso	
0,259	Blanco	
0,267	Blanco amarillento	
0,281	Amarillo de paja	
0,306	Amarillo claro	
0,332	Amarillo brillante	
0,430	Amarillo pardo	
0,505	Naranja rojizo	
0,536	Encarnado	
0,551	Encarnado subido	
0,565	Púrpura	SEGUNDO
0,575	Violeta	
0,589	Indigo	
0,664	Azul celeste	
0,728	Azul verdoso	
0,826	Verde claro	
0,850	Amarillo verdoso	
0,910	Amarillo	
0,948	Naranja	
1,101	Violeta rojizo	
1,128	Violeta azulado	TERCERO
1,151	Indigo	
1,258	Azul verdoso	
1,334	Verde marino	
1,426	Amarillo verdoso	
1,495	Color de carne	
1,534	Carmín	
1,621	Púrpura oscuro	
1,652	Gris violeta	CUARTO
1,682	Azul agrisado	
1,711	Verde marino oscuro	
1,744	Verde azulado	

valiosa para determinar su retardo relativo, pero quizá sea difícil (excepto cuando se posee una larga experiencia) reconocer con certidumbre un tinte determinado entre los muchos indicados anteriormente, si es observado separadamente en el microscopio. De aquí la importancia de poder emplear en el microscopio la cuña de retardo, ya que si se pueden cotejar simultáneamente en el mismo campo la imágen coloreada de la muestra en estudio y los colores de la cuña, resulta entonces mucho más fácil aparejar los colores. Por ejemplo, en la figura 6 (parte superior) se ve una muestra cuyo color se puede definir como rosa, y comparándolo con los colores de polarización dados por la cuña (figura 6, parte inferior) podemos decir que el color más afín es el correspondiente al carmín del tercer orden de la tabla de Quincke, que posee un retardo de 1,53 micrones. Esto puede comprobarse por superposición de la imágen de la muestra sobre la mitad de la rendija, tal como indica la figura 6, en donde se observa que la faja negra de retardo nulo se ha desplazado hasta situarse en oposición con el color previamente similar, lo que prueba que ésta es la propia medida del retardo de la muestra en estudio. Basta entonces medir el grosor de ésta y la bi-refringencia podrá calcularse por la relación indicada más arriba.

Otro método de medida del retardo consiste en emplear una lámina onda en vez de la cuña. La construcción de la cuña es algo complicada en tanto que la primera es relativamente mucho más simple. Una lámina onda consiste en una lámina de exfoliación de mica, de un grosor tal que produce un color de polarización intenso y definido cerca de la zona central de retardos dados por la tabla. En el experimento ilustrado en la figura 7 se ha escogido una lámina que produce un color púrpura del segundo orden (retardo 0,565) cuando está a 45° entre los Nicoles cruzados; si entonces se dispone la imágen de la muestra con una mitad sobre el color de la lámina y se le imprime un movimiento de rotación haciendo girar la platina del microscopio hasta conseguir un brillo máximo, se observará entonces un determinado color (en el caso presente amarillo de paja). Si ahora hacemos girar la muestra 90° aparece una coloración verde-amarillenta en aquella mitad del campo. Según la tabla podemos ver que en un caso la coloración se ha desplazado hacia abajo en la escala de polarización, o sea hacia un valor del retardo de 0,281, en tanto que en el otro caso se eleva el valor del mismo, de hecho, hasta 0,850. Si tomamos como punto de referencia el retardo de la lámina onda (o sea 0,565), vemos que el valor del desplazamiento del color hacia abajo en la escala (0,565 — 0,281) es igual al aumento que tiene lugar en el segundo caso (0,850 — 0,565). Por lo tanto el verdadero retardo ocasionado por la muestra es de 0,284 micrones.

LUZ POLARIZADA CONVERGENTE

En trabajos geológicos, el uso de la llamada luz polarizada convergente es muy apropiado para la diferenciación de los cristales monoaxiales y biaxiales. Las figuras 8 y 9 muestran sus respectivos aspectos característicos; carecemos de suficiente espacio para una más amplia explicación. Las

referencias [1, 2, 4] serán útiles a quienes deseen profundizar más en esta materia.

Si se examinan secciones cristalinas bajo « luz convergente» en el microscopio polarizador, el haz eficaz (ya polarizado) puede considerarse como originado en puntos del plano focal inferior del condensador debajo de la platina (figura 15). Tal luz atraviesa la muestra en haces paralelos cuyas respectivas inclinaciones respecto del eje del microscopio son distintas y convergen en un punto focal en el plano superior del objetivo, en donde es posible examinar los efectos de la polarización. A este fin se dispone una lente en el tubo del microscopio, llamada lente de Bertrand, en la posición indicada diagramáticamente en la figura 15, y que junto con el ocular equivale a un sistema micros-

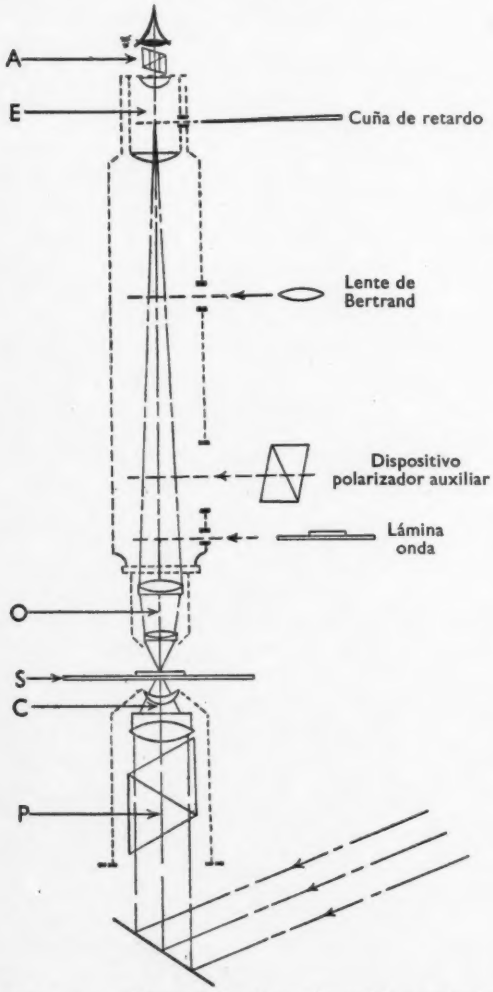


FIGURA 14 – *Sistema óptico de un microscopio polarizador.*

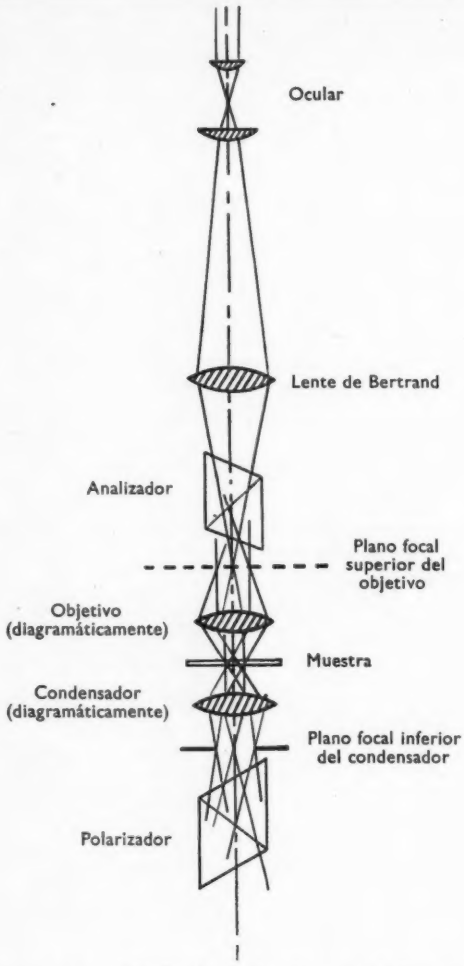


FIGURA 15 – *Disposición de los elementos ópticos para la observación bajo la llamada luz « convergente » (vista diagramática).*

cópico de reducido aumento para la observación del plano focal superior del objetivo. Esto se indica claramente en la figura, mediante el diagrama de la trayectoria de los rayos, así como el camino de los haces paralelos convergentes a través de la muestra. El término « luz convergente » se refiere a haces convergentes de la luz polarizada a través del objetivo en vez de indicar un cono de rayos convergentes, tal como a primera vista podría interpretarse.

Con el microscopio así dispuesto cabe observar los efectos de interferencia producidos por la muestra, dando ya el aspecto de « anillo y escobilla » característico de los cristales monoaxiales o el de los « dos ojos » de los biaxiales.

ROTACION OPTICA

Si se talla una delgada lámina de cuarzo con sus caras perpendiculares al eje óptico y se la coloca entre dos Nicoles cruzados bajo luz monocromática, la luz se transmite a través del analizador; pero girando este último será posible hallar una cierta posición en la que la luz queda totalmente extinguida. Por lo tanto, la luz emergente de la lámina de cuarzo está polarizada en un plano, y el plano según el cual las vibraciones tienen lugar ha sufrido igualmente un giro. Este fenómeno, descubierto por Arago a principios del siglo pasado y más tarde investigado a fondo por Biot, se denomina rotación óptica. Ocurre no sólo con el cuarzo, sino con otros muchos cristales y un número de líquidos tales como la trementina, nicotina, soluciones azucaradas, etc.

Para una substancia determinada el ángulo de giro del plano de vibración es proporcional al grosor de la placa;[1] y para un determinado espesor de la substancia dicho ángulo de rotación es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de onda de la luz empleada. En el caso de una solución ópticamente activa la rotación para un determinado espesor de la solución es casi exactamente proporcional al peso de la substancia activa disuelta por unidad de volumen.

Estos principios han sido aplicados a la industria y otras ramas de estudio, por medio de los polarímetros y sacarímetros, pero pueden ser empleados conjuntamente con el microscopio polarizador. Por ejemplo, si disponemos el instrumento como indica la figura 15, pero sin objeto alguno en la platina y con los Nicoles paralelos aparecerá en el plano focal superior del objetivo una imágen circular del diafragma de debajo la platina. Crucemos entonces los Nicoles (con lo que se obtiene un campo oscuro) y hagamos la lectura del cuadrante fijo del polarizador.[2] Si colocamos ahora en la platina una pieza, por ejemplo, de cuarzo cortado perpendicularmente a su eje óptica, el campo aparecerá nuevamente iluminado, pero podremos restablecer la oscuridad dando un giro todavía mayor al polarizador. Determinando así la rotación angular y midiendo el grosor de la substancia podemos entonces calcular la rotación por milímetro de espesor; conociendo este valor queda facilitada la identificación de una substancia. Algo parecido podríamos decir respecto de un líquido contenido en un recipiente de espesor conocido, colocado en la platina; aunque en este caso la precisión de las medidas no sea muy grande debido a que la rotación por milímetro de la mayoría de los líquidos activos es mucho menor y también porqué la distancia entre el objetivo del microscopio y la platina limita la distancia entre las paredes del recipiente. Sin embargo, este procedimiento ayuda con frecuencia la identificación de la substancia si se le emplea conjuntamente con otros ensayos.

El presente artículo se ciñe a la aplicación general de la luz polarizada al microscopio, pués es ya bien conocido su general uso en geología y mineralogía; hasta ahora no ha sido tan aplicada a la biología. Los recientes trabajos sobre análisis por medio de rayos de muchas substancias orgánicas indica que sus moléculas y átomos están dispuestos con gran regularidad y bajo la luz polarizada se comportan parecidamente a las substancias bi-refringentes. Por lo tanto el estudio sistemático en este sentido (incluyendo, por ejemplo, la medida y tabulación del poder bi-refringente de tales substancias) quizá proporcionara fructíferos resultados.

[1] Por ejemplo, la rotación del plano de polarización producida por una lámina de cuarzo de 1 mm. de espesor es 21,7° para una luz de 5.893 Å de longitud de onda (raya del sodio).

[2] Debe emplearse luz monocromática.

BIBLIOGRAFIA

[1] FINCHAM, W. H. A. *Optics*, 318–42 (Hatton Press).

[2] MARTIN, L. C. *Applied Optics*, vol. 1, 187–225 (Pitman).

[3] JOHNSON, B. K. *Practical Optics*, 131 (Hatton Press).

[4] *Dictionary of Applied Physics*, vol. iv, 490–511 (Macmillan).

[5] JOHANNSEN, A. *Manual of Petrographic Methods*, 371, 373 (McGraw-Hill).

[6] *Proc. Geologists' Assoc.*, 1909, vol. 21 (pt. 2).

La química inorgánica estructural

W. WARDLAW

El investigador científico, absorbido continuamente por sus propios problemas, no suele tener tiempo para reflexionar sobre el pasado, el presente y el futuro de los campos de investigación distintos del suyo. Pensando en ello, el autor de este artículo trata de exponer algunos de los más notables avances en el dominio de la química inorgánica estructural, mencionando también algunos de los problemas que aún están por resolver. Muchas concepciones fundamentales han sido abandonadas a la luz de los trabajos recientes.

Casi todos los estudiosos de la química saben que Joseph Louis Proust, profesor francés de química de la Universidad de Madrid, descubrió que la malaquita, el carbonato de cobre de origen natural, tiene la misma proporción de peso que el carbonato de cobre de preparación artificial. Impresionado por este descubrimiento, Proust analizó una larga serie de substancias y, en 1799, resumió sus conclusiones en la ley de proporción constante, según la cual, cada cuerpo está invariablemente compuesto por los mismos elementos unidos en la misma proporción. En los últimos años, sin embargo, se han acumulado las pruebas — especialmente en la química de los cristales — en favor de un cambio de nuestras ideas sobre dicha ley fundamental de la combinación química.

La ley de la proporción constante se cumple rigurosamente en las substancias formadas por moléculas finitas estables, tales como las del nitrógeno, del anhídrido carbónico, del hidrógeno, etc. Rige también en los compuestos iónicos binarios, como la sal común y el carbonato de calcio. Esto significa, esencialmente, que la ley de la proporción constante depende de los enlaces definidos y directos de los electrones combinados, o de la necesaria igualdad de las cargas iónicas positivas y negativas. Pueden ocurrir, asimismo, compuestos complejos ajustados a la ley, si las condiciones de la combinación geométrica del cristal son tales que el tamaño de los diversos componentes sea muy diferente y la estructura se mantenga bien unida.

Hay importantes grupos de substancias en los que las proporciones combinadas pueden variar y en los que las leyes de valencia se cumplen sólo aproximadamente, como son los sulfuros metálicos, los arseniuros y los antimoniuros. Examinando la literatura química se ve que los analizadores han asignado a la pirrotita mineral fórmulas que varían desde Fe_6S_7 hasta $Fe_{11}S_{12}$. Para explicar la variable composición, se ha hecho la fácil sugerencia de que los átomos del azufre añadido se ajustan en los intersticios de un ideal entramado FeS. Pero esta idea no puede mantenerse, porque los cristalólogos han demostrado que no hay en tal entramado suficiente espacio para acomodar a los átomos de azufre. Se han dado otras dos explicaciones razonables. Puede ocurrir que en el entramado los átomos de azufre reemplacen a los átomos de hierro en cierta medida, o que haya posiciones de hierro vacantes. Que esta última es la verdadera explicación se puso en claro con los trabajos de Hägg y Sücksdorff [1], en 1933. Estos investigadores compararon las densidades y las medidas de las unidades celulares de diversas muestras de pirrotita. Los resultados de su investigación aparecen resumidos en la figura 1, tomada de su memoria. La curva superior indica el efecto calculado sobre la densidad, al substituir el hierro por azufre, mientras que la curva inferior muestra el efecto calculado, al retirar átomos de hierro de algunos de los puntos del entramado. La conclusión es clara. La variación en la composición de la pirrotita ocurre al retirarse los átomos de hierro de algunos de los puntos del entramado.

Es pertinente preguntar cuál es la posición de las leyes de las proporciones definidas y múltiples. Estas leyes fueron formuladas en un período en que los compuestos químicos conocidos eran del tipo más simple. A la luz del ulterior conocimiento, se reconoce que esas leyes sólo son aplicables a tipos restringidos de compuestos químicos. Son excepciones de la regla muchos hidruros, fosfuros, sulfuros, seleniuros y arseniuros; ciertos óxidos y yoduros, y algunos compuestos complejos [2].

En el reino de la química inorgánica, el estudio de la ordenación de los átomos en los cuerpos sólidos ha hecho que los problemas químicos sean enfocados desde un ángulo enteramente nuevo. Los químicos inorgánicos postularon en otro

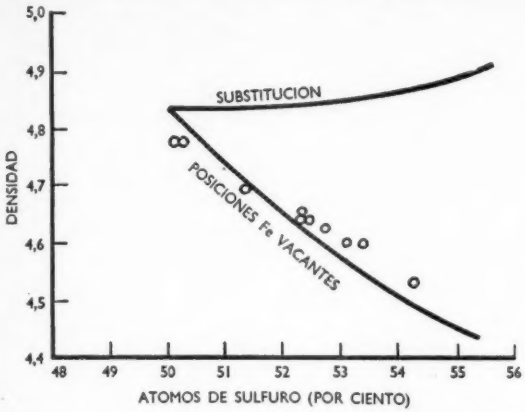
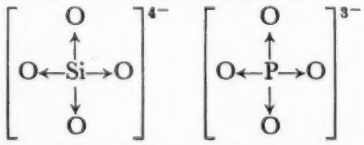


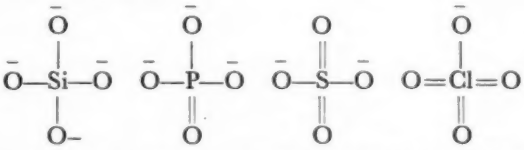
FIGURA 1 – *Los círculos muestran la variación observada de densidad con la composición.*

tiempo una serie de ácidos silícicos como base de la composición de los silicatos minerales. Hoy se reconoce que las rocas están hechas con átomos de oxígeno unidos con silicio, aluminio y otros átomos metálicos. Sabido es que los ocho elementos comunes — oxígeno, silicio, aluminio, hierro, magnesio, calcio, sodio y potasio — forman el 98% de la corteza sólida de la Tierra, y el grueso de esta corteza es oxígeno. La distribución de estos elementos es muy curiosa. Cada átomo de silicio está rodeado por cuatro átomos de oxígeno, de modo que los cuatro átomos de oxígeno están colocados en las esquinas de un tetraedro, en cuyo centro se halla el silicio. La mayor parte del aluminio de la corteza terrestre está distribuído de un modo similar al silicio. El hierro, el magnesio y el resto del aluminio tienen una distribución diferente. Seis átomos de oxígeno se agrupan en las esquinas de un octaedro con un átomo de hierro, de magnesio o de aluminio, en el centro. De este modo, el aluminio desempeña un doble papel, asociándose generalmente en forma tetraédrica con el oxígeno, pero conduciéndose a veces como los metales hierro y magnesio. Finalmente, los iones de álcali y alcalino terrestre

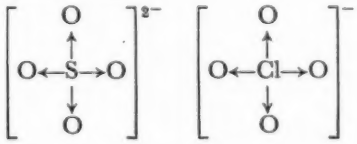


se acomodan en los grandes agujeros de la estructura, frecuentemente asimétricos. El feldespato potásico, uno de los más importantes minerales de las rocas, tiene la fórmula empírica $KAlSi_3O_8$ y está formado realmente de silicio y aluminio, ligados tetraédricamente en todos sus ángulos y direcciones, y constituyendo un entramado tetraédrico de tres dimensiones. En sus intersticios se enredan iones de potasio. Es un hecho interesante que el magnesio y el hierro no se encuentran nunca en el feldespato, dándose de ello una explicación muy convincente. Es geométricamente imposible ajustar un octaedro a una estructura tetraédrica ligada por todas sus esquinas. Por consecuencia, el magnesio y el hierro, que tienen seis enlaces con átomos de oxígeno, están excluídos de la estructura del feldespato.

En lo que se refiere a los enlaces del oxígeno con los elementos no metálicos, la estructura de los iones del tipo XO_4 es de un interés particular. Las fórmulas clásicas presentaban el átomo central con la valencia:



Hasta un tiempo reciente, las citadas fórmulas habían caído en desuso, debido principalmente al éxito con que muchos compuestos podían ser sistematizados presuponiendo que el grupo de valencia de los electrones fuese un octeto; sugestión hecha por G. N. Lewis en 1916. Presumiendo que cada enlace supone la participación de dos electrones — uno por cada átomo — las fórmulas clásicas exigen que los átomos centrales Si, P, S y Cl tengan grupos de valencia de 8, 10, 12 y 14 electrones, respectivamente. En la teoría del octeto, sin embargo, puede ofrecerse otra fórmula en alternativa, si se presume que los dos electrones ligando cada átomo de oxígeno puedan ser provistos por el átomo central. Este tipo de enlace fué llamado enlace coordinado y fué designado con el símbolo →. Los átomos Si, P, S y Cl, con arreglo a este enlace, pueden formar iones del siguiente modo:



Para apoyar estas fórmulas, se hicieron medidas del paracor y observaciones estéreoquímicas. En 1937, L. Pauling y L. O. Brockway [3] señalaron que la longitud de los enlaces en los iones de

oxiácido común, revelados por los análisis de cristales con rayos X, es mucho más corta que la de los radios covalentes de simple enlace de los átomos. Las longitudes de los enlaces en los iones tetraédricos son las siguientes:

	Si—O	*P—O*	*S—O*	*Cl—O*
Observado ..	1,60	1,55	1,51	1,48
Calc. X—O ..	1,83	1,76	1,70	1,65
X=O ..	1,65	1,58	1,53	1,48

¿Qué significa este acortamiento? Pauling interpreta estos resultados como indicadores de que existe una resonancia entre diversas estructuras posibles con doble enlace sujetando uno o más de los átomos de oxígeno. En el caso del cloro, la distancia Cl—O es la que era de esperar para un doble enlace puro. Para formular estos iones oxiácidos, Pauling [4] sugiere que deberían emplearse, en general, las fórmulas clásicas. Desde luego, las fórmulas clásicas no están enteramente de acuerdo con las distancias de enlaces presentadas en el cuadro. Las fórmulas clásicas exigirían resonancia entre los enlaces simples y dobles, y las distancias del enlace final serían mayores que el valor de un doble enlace covalente. Hay pruebas evidentes de que un enlace coordinado puede ser más corto que un enlace covalente simple normal. Por ejemplo, la distancia N—O es 1,43 Å, considerablemente más larga que la longitud del enlace nitrógeno-oxígeno en $(CH_3)_3N \rightarrow O$, que es 1,36 Å. Es indudable que en el momento actual no existe ningún método para formular estos iones, que no suscite alguna objeción.

La estructura del monóxido de carbono continúa despertando interés. Los antiguos químicos consideraban el carbono como bivalente en ese óxido y encontraban la fórmula C=O enteramente satisfactoria. Langmuir propuso en 1919 una nueva fórmula, en la cual el carbono tenía su octeto de electrones. En la fórmula primitiva, el carbono tiene un sexteto de electrones. Sin embargo, al trabar una de las parejas sueltas de electrones de oxígeno, el carbono completa su octeto:

$:C::\ddot{O}:$ (o C=O) se convierte en

$:\bar{C}:::\overset{+}{O}:$ (o $\bar{C}\equiv\overset{+}{O}$).

Los argumentos desarrollados en favor de esta estructura de triple enlace de Langmuir comprenden consideraciones sobre el momento eléctrico bipolar, las distancias interatómicas, la constante de la fuerza y la teoría de la órbita molecular. Por ejemplo, Sidgwick [5] subrayó en 1933 que el minúsculo momento del monóxido de carbono sólo puede ser explicado suponiendo que el irregular reparto de electrones entre el carbono y el oxígeno sea compensado por la transferencia de un electrón desde el oxígeno al carbono. Pauling sugirió en 1939 que la molécula CO debe ser considerada como una resonancia híbrida de las formas:

$\bar{C}\equiv\overset{+}{O}$ (*a*) $\quad$ C=O (*b*) $\quad$ $\overset{+}{C}—\bar{O}$ (*c*)

Presentó argumentos para apoyar la opinión de que las estructuras (*a*), (*b*) y (*c*) contribuyen aproximadamente igual al estado normal de la molécula. El escaso valor del momento eléctrico bipolar parece probar que la contribución hecha por la estructura (*c*) debe ser aproximadamente la misma que la de la estructura (*a*). La estructura (*b*) no parece tener un gran momento bipolar, mientras que el de las estructuras (*a*) y (*c*) es muy grande. Sólo si las estructuras (*a*) y (*c*) contribuyen aproximadamente en la misma medida, puede ser pequeño el momento resultante de la molécula, de acuerdo con el experimento. Recientemente, sin embargo, L. H. Long y A. D. Walsh [6] han señalado que es perfectamente posible dar una descripción orbitaria molecular del enlace del monóxido de carbono, que equivale aproximadamente a un doble enlace. La gran estabilidad del monóxido de carbono ha sido esgrimida frecuentemente contra la posibilidad de formularlo como C=O. En 1946, L. H. Long y R. G. W. Norrish [7] apuntaron una razón para explicar por qué CO no se polimeriza en O=C=C=O. Su argumento indica que, para excitar la molécula CO a una radical con dos valencias libres sería necesaria una excitación de energía de más de 75 kcal., y que la energía requerida para excitar dos moléculas en esta forma es mayor que la energía normalmente asociada con el enlace C=C. Parece, pues, razonable pensar que los intentos para preparar C_2O_2 han sido infructuosos porque esta substancia es inestable. En resumen: la fórmula de doble enlace C=O, aunque no esté libre de objeciones, es tal vez la mejor representación de esta molécula, por el momento.

Intimamente asociada con el problema de la constitución del monóxido de carbono, se nos presenta la cuestión de la estructura de los carbonilos metálicos. En otro tiempo, parecía haber

firmes razones para formular los carbonilos metálicos como $M \leftarrow \overset{-}{C} \equiv \overset{+}{O}$, o como $\overset{-}{M}—C \equiv \overset{+}{O}$. Aquí el monóxido de carbono suministra dos electrones para formar un enlace coordinado con el átomo metálico. En 1935, en una investigación por el método de difracción electrónica, Brockway y Cross [8] hallaron que la distancia níquel-carbono era 1,82 Å, mientras que la distancia teórica para un doble enlace es alrededor de 1,79 Å. Esto parece apoyar la opinión de que los enlaces níquel-carbono tienen un gran porcentaje de enlaces dobles, lo que significa que CO debe ser representado aproximadamente como C=O. Sin embargo, aunque la estructura del carbonilo de níquel es en estas circunstancias Ni=C=O, hay probablemente resonancia, y la configuración

$$\begin{array}{l} \quad\;\; | \\ —\overset{4-}{Ni} : C : : : \overset{+}{O} \\ \quad\;\; | \end{array}$$

debe ser tomada también en consideración. Se han hallado pruebas para estos dos tipos de enlace en los resultados obtenidos por los análisis con rayos X del sólido $Fe_2(CO)_9$. Powell y Ewens [9] encontraron que tres de los grupos CO forman enlaces

$$\begin{array}{l} Fe \diagdown \\ \qquad\quad C=O, \\ Fe \diagup \end{array}$$

como en las quetonas. La distancia C=O en estos grupos es ca. 1,3 Å, comparable con la de las quetonas y mucho más grande que la de los seis grupos CO restantes, que es de 1,15 Å. Se ha sugerido que el enlace es aquí $\overset{-}{Fe}—C \equiv \overset{+}{O}$. Sobre los datos de una investigación de difracción electrónica, se le ha dado al pentacarbonilo $Fe(CO)_5$ una estructura bipiramidal trigonal [10]. Aquí las distancias hierro-carbono de 1,84 Å indican un considerable carácter de doble enlace. Finalmente, el método de difracción electrónica, aplicado a los interesantes carbonilos sólidos $Cr(CO)_6$, $Mo(CO)_6$ y $W(CO)_6$ [11], que pueden ser sublimados sin descomposición, ha indicado que tienen una configuración octaédrica regular, con distancias metálico-carbónicas de simple enlace, principalmente.

Werner formuló la malaquita mineral como

$$\left[Cu \left(\begin{array}{l} HO \diagdown \\ \qquad\quad Cu \\ HO \diagup \end{array} \right) \right] CO_3.$$

En realidad, la malaquita mineral no contiene un ion complejo, sino que consiste en una distribución en tres dimensiones de iones Cu^{2+}, CO_3^{2-} y OH^-. Los peligros de adoptar fórmulas empíricas simples se prueban con el caso del cloruro $CsAuCl_3$. Éste no es un ejemplo de oro bivalente sino una sal compleja que contiene oro monovalente y trivalente con la composición $Cs_2Au'Au'''Cl_6$ [12]. En el estado sólido, se ha visto por medio de los rayos X que el pentacloruro fosfórico consiste en iones tetraédricos $(PCl_4)^+$ y octaédricos $(PCl_6)^-$ [13]. Una plena determinación de la estructura de $(NH_4)_3ZnCl_5$ ha revelado que esta substancia [14] está formada de iones NH_4^+, Cl^- y $(ZnCl_4)^{-2}$, y que la verdadera fórmula es $(NH_4)_2ZnCl_4$, NH_4Cl. Como en el caso del pentacloruro fosfórico, la coordinación de cinco pliegues ha sido también evitada.

En los grandes avances hechos en la química estructural, especialmente en los últimos años, ha influído mucho el uso de los métodos físicos. Los resultados obtenidos pueden ser de una gran significación. Bernal ha señalado que la elucidación de las estructuras de los sulfuros metálicos, los arseniuros y los antimoniuros puede arrojar nueva luz sobre la génesis de los minerales metálicos.

BIBLIOGRAFIA

[1] HÄGG, G., y SÜCKSDORFF, I. *Z. physical. Chem.*, 1933, B22, 444.

[2] ANDERSON, J. S. *Ann. Reports Chem. Soc.*, 1946, **43**, 104.

[3] PAULING, L., y BROCKWAY, L. O. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1937, **59**, 13.

[4] PAULING, L. *Nature of the Chemical Bond*, 1940, p. 242.

[5] SIDGWICK, N. V. *The Covalent Link in Chemistry*, 1933, p. 187.

[6] LONG, L. H., y WALSH, A. D. *Trans. Faraday Soc.*, 1947, **43**, 344.

[7] LONG, L. H., y NORRISH, R. C. W. *Proc. Roy. Soc.*, (A), 1946, **187**, 337.

[8] BROCKWAY, L. O., y CROSS, P. C. *J. Chem. Phys.*, 1935, **3**, 828.

[9] POWELL, H. M., y EWENS, R. V. G. *J. Chem. Soc.*, 1939, 286.

[10] EWENS, R. V. G., y LISTER, M. W. *Trans. Faraday Soc.*, 1939, **35**, 681.

[11] BROCKWAY, L. O., EWENS, R. V. G., y LISTER, M. W. *Ibid.*, 1938, **34**, 1350.

[12] ELLIOTT, N., y PAULING, L. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1938, **60**, 1846.

[13] POWELL, H. M., CLARK, D., y WELLS, A. F. *J. Chem. Soc.*, 1942, 642.

[14] KLUG, H. P., y ALEXANDER, L. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1944, **66**, 1056.

Los cohetes aplicados a la exploración

ARTHUR C. CLARKE

Durante la última generación hemos visto como la propulsión por reacción ha pasado desde constituir el interés de unos pocos entusiastas a ser considerada como un propio campo de investigación física que ha proporcionado resultados prácticos de gran importancia. En este artículo, Mr. Clarke analiza la base matemática de la propulsión por reacción relacionada, especialmente, con el lanzamiento de proyectiles a grandes altitudes y hacia el espacio libre, lo que no parece ya ser objetivo inaccesible.

Aunque el cohete fué inventado hace unos siete siglos, su desarrollo como arma de guerra y como instrumento de investigación a grandes altitudes ha tenido lugar durante los últimos veinte años. El primer estudio científico de las posibilidades del cohete fué realizado por el ruso Ziolkovsky a fines del pasado siglo, pero su trabajo fué poco conocido fuera de su propio país. La era moderna de tales investigaciones puede decirse que se inicia con el americano R. H. Goddard (1882–1945) y el rumano Herman Oberth (1894–), cuyos trabajos dieron a esta materia una sólida base matemática [1, 2].

Las notables propiedades del cohete se deben a que es mucho más simple y potencialmente de mayor rendimiento que las demás máquinas térmicas. No existe limitación previa al tamaño del cohete — por ejemplo el V2 desarrollaba más de 600.000 C.V. y hay unidades todavía mayores en estudio. Además, puesto que es puramente un mecanismo de reacción y contiene su propio combustible y oxidante, resulta independiente del medio. Por lo tanto, el cohete es el único sistema de propulsión conocido que puede operar en el vacío, donde de hecho tiene un rendimiento mayor que en la atmósfera.

El problema de alcanzar altitudes muy elevadas es, en esencia, un problema de balística, ya que en la mayor parte de su trayectoria el cohete puede ser considerado como un simple proyectil. Para alturas y velocidades ordinarias es aplicable la conocida ley $h = v^2/2g$ (despreciando la resistencia del aire), pero esta ecuación parabólica asume que g es constante para toda la trayectoria del proyectil; sin embargo, cuando la velocidad inicial de este último excede los 3 Km./s., alcanza alturas donde la gravedad se reduce apreciablemente. La figura 1 indica la variación de la ley asumiendo la gravedad constante y su correcto valor teniendo en cuenta su reducción con la distancia. Se puede observar que la curva de altitud varía rápidamente para valores de 10 Km./s. y llega a un valor infinito para la llamada « velocidad de liberación » de 11,2 Km./s.

Las mayores velocidades alcanzadas por cohetes hasta ahora son de unos 1,5 Km./s. con alturas máximas de 180 Km. Tales resultados fueron conseguidos por los V2, artefactos puramente militares, y será posible mejorarlos notablemente con cohetes construídos exprofeso para investigaciones a gran altura. Recientemente se han dado a conocer los detalles de un cohete de sondeo (*Neptune*) actualmente en construcción para la marina de los Estados Unidos, cuyas curvas de rendimiento, que damos en la figura 2, claramente indican las características principales de este aparato.

El cohete consume su combustible (alcohol y oxígeno líquido) en 75 segundos y durante este tiempo se eleva verticalmente a 60 Km. y alcanza una velocidad de 2,5 Km./s. Tal impulso le permite llegar hasta 400 Km. de altura en un tiempo de ascensión total de 335 segundos. El *Neptune* (que debería estar en uso hacia fines de 1948) ha sido proyectado para llevar una carga de 50 Kg. de instrumentos hasta 400 Km. de altura, pero puede llevar una tonelada hasta 140 Km.

El desarrollo de tales aparatos abre nuevos horizontes a la investigación científica y se han logrado resultados notables por los investigadores americanos en White Sands, Nuevo México, con V2 modificados. Por primera vez se han conseguido lecturas directas de temperatura y presión a alturas en el seno de la ionosfera, y recientemente se obtuvieron los primeros espectrogramas de la radiación solar ultravioleta, la cual no puede penetrar la atmósfera terrestre. Se ha mejorado la técnica para la transmisión contínua a los receptores en tierra de las observaciones durante el vuelo del cohete y se ha conseguido también recuperar intactos los aparatos después de su caída.

La meteorología, la física y la astronomía — para citar tan sólo tres ciencias — habrán de beneficiarse de los sondeos regulares por cohetes. Aparte de esto, debemos confesar que tales investigaciones poseen un interés — casi diríamos un encanto — que sólo se encuentra en las espectaculares ramas de la física atómica. Los cohetes de gran altitud han proporcionado nuestra real libertad de movimiento en las tres dimensiones, aunque, de momento, tal libertad sea sólo delegada.

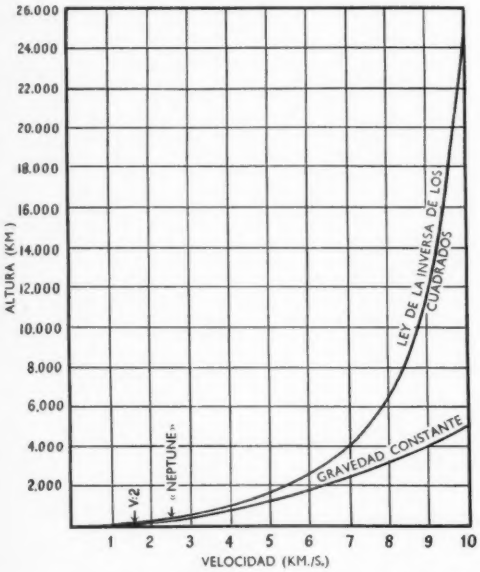


FIGURA 1 – *Relación entre la velocidad de proyección y la altura,* (a) *suponiendo que el campo gravitatorio es constante,* (b) *suponiendo que la gravedad decrece según la ley de la inversa de los cuadrados.*

La velocidad que alcanza un cohete — y de ahí su alcance — depende de dos factores: (1) la velocidad del chorro o escape y (2) la razón de masas, que es la razón entre el peso inicial del cohete y su peso final después de consumido el combustible. Si v es la velocidad del chorro y R la razón de masas, entonces en ausencia de otras fuerzas la velocidad final conseguida por el cohete viene dada por la expresión:

$$V = v \log_e R.$$

Para un cohete lanzado verticalmente desde la Tierra hay que tener en cuenta la gravedad y la resistencia del aire, con lo que la velocidad final alcanzada se reduce a:

$$V = v \log_e R - gt - F(V,h)$$

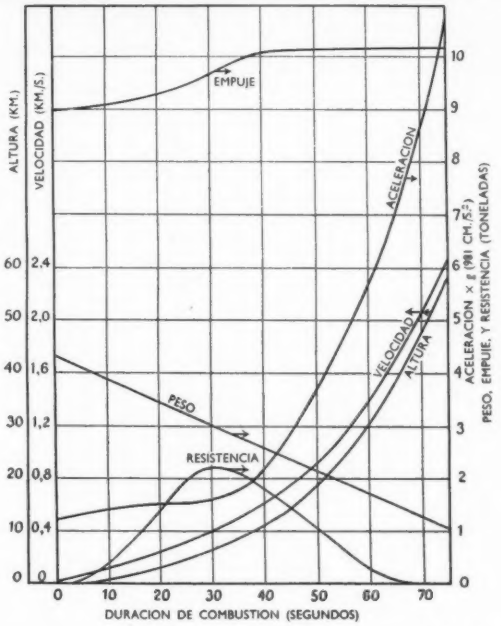


FIGURA 2 – *Curvas características calculadas para el cohete de sondeos* Neptune *de la Marina de los Estados Unidos.*

donde t es el tiempo de combustión y $F(V,h)$ es un término que depende, según una función compleja, de la forma del cohete, altitud y velocidad.

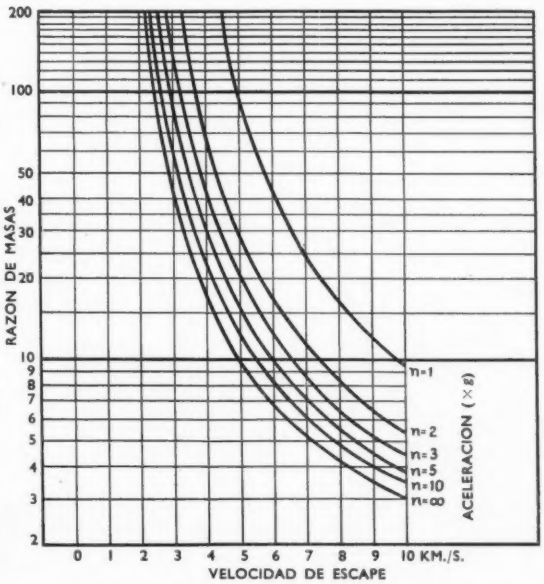


FIGURA 3 – *Relación entre la velocidad de escape y la razón de masas para cohetes de distintas aceleraciones.*

FIGURA 4 – *Fotografía de la Tierra tomada desde una altura de 160 Km. por medio de un cohete V2 lanzado en Nuevo México. El área abarcada es de 500.000 Km. cuadrados. Se aprecia claramente la curvatura de la Tierra.*

Afortunadamente, tal como la curva de resistencia de la figura 2 indica, la resistencia del aire se reduce prácticamente a cero en tanto que la altura y velocidad del cohete aumentan y la pérdida debida a este factor no es más que de un 10 o 20%. Podría ser apreciablemente reducida por medio de lanzamientos desde la cúspide de una montaña, lo que quizá valga la pena en determinadas aplicaciones. La pérdida gravitacional *gt* puede mantenerse reducida adoptando aceleraciones elevadas o sea corta duración de la combustión; la aceleración final del *Neptune* es algo superior a 10*g*.

De las dos variables *v* y *R*, la primera es la más crítica ya que siendo el logaritmo de *R* el que interviene en la fórmula de la velocidad final, las variaciones en el valor de *R* tienen menor influencia que parecidas variaciones de *v*. Se han conseguido velocidades de los gases de escape de 2,5 Km./s. con los motores modernos y combustibles del tipo alcohol-oxígeno. Existen combustibles más potentes, pero su empleo no es posible debido a las altas temperaturas que desarrollan. Incluso los combustibles actuales deben emplearse diluídos a fin de reducir la temperatura de la cámara de combustión bajo los 3.000° K. Cuando se logre vencer estas limitaciones quizá se alcancen velocidades de 5 Km./s. El químico y el metalúrgico hallan aquí un campo de investigación inmenso, cuya magnitud puede imaginarse por el hecho de que, durante la guerra, en un solo centro alemán se probaron más de 6.000 combustibles para cohetes.

La razón de masas *R* está limitada por consideraciones simplemente técnicas, en especial por el peso muerto del motor y los tanques de combustible. Para el V2 es alrededor de 3,5; para el *Neptune*, como indica la figura 2, será algo superior a 4. Posiblemente se llegará a duplicar este valor con un cohete de una simple etapa de acción. Si suponemos un valor igual a 7 podemos ver que, a su debido tiempo, será posible construir cohetes capaces de desarrollar velocidades de 5 . log 7, o sea de 10 Km./s. Suponiendo una pérdida de 2 Km./s. debida a la resistencia del aire y la gravedad, tales proyectiles podrían llegar a alturas de 6.000 Km.

Esta altura, aunque es considerable relativamente a las magnitudes corrientes, es tan sólo igual a un radio terrestre. Para sobrepasarla, y en particular para lograr la velocidad de liberación, se involucran problemas más difíciles, pero no insuperables. La posibilidad de hacer llegar a la Luna un cohete portador de instrumentos ha atraído mucha atención recientemente. En particular debemos mencionar la sugerencia de Chapman [3] para enviar a la Luna un magnetómetro a fin de verificar las ideas de Blackett referentes al campo magnético de los cuerpos giratorios.

Tal como se ha indicado anteriormente, la velocidad de liberación desde la Tierra debe ser de 11,2 Km./s. al momento de completarse la combustión, y la figura 3 muestra lo que esto implica en términos de la razón de masas y velocidad de escape para cohetes de diferentes aceleraciones. Las curvas indican que con combustibles y motores en la zona de los 3–4 Km./s., se requiere una razón de masas de 100 para lograr la velocidad de liberación. A primera vista puede parecer imposible poder construir un cohete con un peso de, por ejemplo, 100 toneladas, 99 de las cuales son de combustible y la tonelada restante destinada a la estructura, motores, depósitos y carga útil. Tal dificultad puede soslayarse, sin embargo, mediante el llamado cohete múltiple o por « etapas ».

Si se destina un cohete a acarrear otro cohete de menor tamaño hasta una altura considerable y entonces el primero cae libremente, el segundo poseerá ya una elevada velocidad cuando su combustible está todavía intacto. Este proceso puede repetirse teóricamente por cualquier número de « etapas », y podría así lograrse que un cohete con una masa inicial de centenares y aún millares de toneladas tuviera una masa final de tan sólo dos o tres toneladas. Resulta así posible, al menos en principio, proyectar máquinas capaces de llegar a la Luna o planetas, aún con combustibles químicos. Recientes estudios muestran que sería preciso un peso inicial de 50 toneladas para hacer llegar una carga útil de 50 Kg. a la Luna, pero tales cifras varían considerablemente con las velocidades de escape que se asuman.

Es interesante hacer notar que el cohete múltiple no es simplemente un instrumento teórico. En los últimos meses de la pasada guerra, unos veinte proyectiles, conocidos por *Rheinbote* fueron lanzados sobre Amberes desde una distancia de unos 150 Km. Se han divulgado pocos datos sobre este arma, pero se sabe que era un cohete de cuatro etapas.

En resumen, podemos decir que cuando los problemas exclusivamente de ingeniería hayan sido dominados será posible lanzar proyectiles de investigación al espacio hasta distancias considerables, y recibir además datos informativos

en tanto dure su vuelo. Una de las posibilidades más interesantes abiertas ante nosotros es la obtención de fotografías o imágenes por televisión de la faz invisible de la Luna. Algo no tan espectacular pero quizás más útil consistiría en dirigir cohetes sobre órbitas permanentes alrededor de la Tierra, desde donde podrían radiarnos, durante largos períodos, los resultados de sus instrumentos. Un cuerpo moviéndose a 8 Km./s. apenas fuera de nuestra atmósfera continuaría moviéndose indefinidamente alrededor de la Tierra, como un satélite artificial, y escogiendo una velocidad apropiada se podría hacer mover un cuerpo sobre una órbita a una deseada altura y con un período desde una hora y media para arriba. La órbita de 24 horas, con un radio de 42.000 Km., podría tener importantes aplicaciones, ya que un cuerpo moviéndose sobre ella aparecería fijo sobre un determinado lugar de la Tierra. Esto abre la posibilidad de mantener instrumentos científicos fijos en el firmamento, desafiando aparentemente la ley de la gravedad. Se ha sugerido que el problema de la televisión a gran distancia podría resolverse por medio de estaciones de retransmisión en tales órbitas [4].

La tarea de hacer llegar seres humanos hasta la Luna y asegurar su regreso a la Tierra es, evidentemente, mucho más difícil que no el simple lanzamiento de proyectiles controlados hacia los espacios. Los estudios teóricos indican que quizás esto pueda lograrse con cohetes múltiples usando combustibles químicos, pero las dificultades y su coste serían considerables, ya que cada kilogramo para el viaje de ida y vuelta requeriría por lo menos una tonelada de combustible para su lanzamiento.

Parece estarse de acuerdo en que los verdaderos navíos del espacio capaces de llegar a otros planetas no serán practicables hasta que la energía atómica sea encauzada para la propulsión de los cohetes — y de todas las aplicaciones de la energía atómica ésta parece ser la más difícil. No hay duda de que las reacciones nucleares podrían producir energía sobrada para cualquier viaje interplanetario imaginable. Sirva de ejemplo el hecho que los pocos kilogramos de materia en las bombas probadas en Bikini produjeron energía suficiente para acarrear mil toneladas a la Luna y regreso.

Los planes sugeridos para cohetes propulsados atómicamente [5, 6] se basan en reacciones de cadena de temperaturas muy altas que aceleren corrientes gaseosas a través de la tobera de propulsión. Para una determinada temperatura de la cámara de combustión la velocidad de escape varía en razón inversa a la raíz cuadrada de su peso molecular. El impulso comunicado al cohete por el chorro de gas depende del momento cinético de éste, o sea su masa × velocidad; así, para una determinada masa, el gas que posea el menor peso molecular tendrá la máxima velocidad de escape y por ende desarrollará el máximo momento. En el cohete con propulsión química los gases de escape son generalmente anhídrido carbónico y vapor de agua, pero un cohete atómico podría emplear el hidrógeno o el helio como elemento de propulsión ya que en este caso no tiene lugar combustión alguna. Así sería posible conseguir velocidades de escape tres o cuatro veces superiores para una misma temperatura de la cámara de combustión, con la consiguiente reducción del combustible empleado. Los problemas técnicos inherentes son formidables, pero en América se han iniciado trabajos en tal sentido bajo el proyecto NEPA (« Nuclear Energy —Propulsion of Aircraft ») y quizás sea lo mismo en otras partes. La figura 3 muestra cómo un aumento de la velocidad de escape hasta la zona de unos 10 Km./s. reduciría la razón de masas necesaria para liberarse de la Tierra hasta un valor tal que podría conseguirse con un cohete simple como los actuales. Los viajes interplanetarios y de regreso requerirían el empleo de cohetes de considerables dimensiones, pero los pesos iniciales serían del orden de centenares, en vez de millares, de toneladas.

BIBLIOGRAFIA

[1] GODDARD, R. H. «A Method of reaching Extreme Altitudes» (Smithsonian Misc. Coll., LXXI (1919), No. 2).

[2] OBERTH, H. *Wege zur Raumschiffahrt* (Munich, 1929; U.S.A., 1945).

[3] *Nature*, **160**, 4064 (20 sept. 1947).

[4] CLARKE, A. C. « Extraterrestrial Relays », *Wireless World*, oct. 1945.

[5] SHEPHERD, L. R. « The Problem of Interplanetary Propulsion », *Bulletin of the British Interplanetary Society*, **I**, 9, nov. 1946.

[6] CLEAVER, A. V. « Interplanetary Flight », *Journal of the B.I.S.*, **VI**, 5, junio 1947.

General

[7] LEY, W. *Rockets and Space Travel* (New York, 1947).

[8] KOOY, J. M. J., y UYTENBOGAART, J. W. H. *Ballistics of the Future* (Haarlem, 1946).

El cultivo de tejidos vegetales

R. J. GAUTHERET

Los métodos para el desarrollo de tejidos animales en cultivos aislados se llevaron a cabo con resultado satisfactorio hace más de 35 años, pero el cultivo de tejidos vegetales fué más difícil y no se consiguió un éxito completo hasta muy poco antes de estallar la última guerra. En este artículo se describen los métodos empleados en el cultivo de tejidos vegetales, el uso de los cultivos para el estudio de los problemas de morfogénesis, patología y fisiología, y sus aplicaciones en la investigación de las agallas de los vegetales.

RESUMEN HISTORICO

Han pasado ya casi tres siglos desde que las primeras tentativas de análisis estructural de los organismos dieron cima al descubrimiento de la célula. Las observaciones ulteriores realizadas en animales y vegetales condujeron a los biólogos a formular la teoría celular según la cual la célula representa una unidad morfológica y fisiológica. Luego los histólogos del período clásico, después de comprobar la universalidad de la estructura celular, confirmaron la conclusión primera de dicha teoría. No obstante, no fueron tan afortunados con respecto a la segunda, habida cuenta de que sus estudios se hacían sobre organismos muertos y cortados en secciones muy delgadas, siéndoles imposible la demostración de la individualidad fisiológica de la célula.

Para llegar a esta demostración era indispensable comprobar en las células su capacidad de sobrevivir y multiplicarse fuera del organismo. El botánico Haberlandt fué el primero en darse cuenta del interés de tal experimento. Desde 1902 se dedicó a cultivar diversas células vegetales epidérmicas, parenquimatosas. El fracaso fué completo puesto que los elementos ya maduros por él utilizados estaban demasiado diferenciados para conservar posibilidades de multiplicación *in vitro*.

Estudios parecidos sobre células animales dieron resultados más halagüeños, y así vemos que Harrison en 1907 consigue mantener por algún tiempo la proliferación de fragmentos de tejido de rana, y cinco años más tarde Carrel cultivó indefinidamente fibroblastos de polluelo.

Estimulados por estos resultados los botánicos volvieron a insistir de nuevo en el problema del cultivo de tejidos; pero durante largos años sus intentos fueron infructuosos, hasta que en 1922 el americano Robbins dió con el camino que debía conducirle al éxito. Partió del principio de que la realización del cultivo de tejidos vegetales no es posible sino utilizando células capaces de proliferación normal, es decir, de células meristémicas. Algunas de estas células se encuentran localizadas en el extremo de los tallos jóvenes o de las raíces de las plantas, en donde forman pequeñas masas compactas conocidas con el nombre de ápices de crecimiento. Robbins aisló las extremidades de las raíces, colocándolas en adecuados medios nutritivos. Su crecimiento y ramificación fueron rápidos, pero su proliferación cesó a los pocos meses. En 1934, White resumió esos experimentos hasta que por fin obtuvo por primera vez el desarrollo indefinido de las raíces aisladas (figura 1). Pero el cultivo de raíces representa en realidad el cultivo de órganos dotados de una forma y estructura definidas, y no era de esperar que semejante método produjera verdaderos cultivos de tejidos.

Para llegar al mismo resultado, desde 1934 tratamos de cultivar un tipo de meristemos distinto de los que Robbins y White emplearon. El segundo tipo de meristemo que utilizamos fué el cambium, o albura, que forma una zona cilíndrica en el interior de los troncos y raíces, entre la corteza y la madera. Se presenta particularmente muy bien desarrollado en los árboles, y, gracias a su actividad, asegura el crecimiento en espesor de los tallos y raíces. En los ensayos de cultivo de albura hemos podido constatar que crece hasta producir masas parenquimatosas desprovistas de organización. La proliferación de estos cultivos cesó a los pocos meses, pero con todo, nuestras tentativas, cuando menos, nos habían suministrado resultados prometedores, justificando nuestras investigaciones que, por fin, culminaron en la realización de verdaderos cultivos de tejidos.

CARACTERISTICAS GENERALES DEL CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES

El punto de partida en un cultivo de tejido vegetal consiste en colocar un fragmento de órgano poco diferenciado sobre la superficie de un adecuado medio nutritivo. Si se emplea un material

favorable, la proliferación empieza al instante y se observa la formación de callosidades parenquimatosas. De este modo se pueden cultivar con éxito trizas de corteza de árbol, fragmentos de tallos herbáceos o de bejucos (figura 2), porciones de órganos carnosos, etc. La proliferación de las que podríamos llamar « plantas artificiales » es muy intensa al principio del cultivo, decrece después de unos meses, cesa luego, y sobreviene finalmente la muerte de las células.

Con objeto de prolongar la actividad de los cultivos se hace indispensable proceder a su transplantación, es decir, se aisla de la « ex-planta » primitiva un fragmento de tejido correspondiente a una región en vías de crecimiento rápido y se la traslada a un medio nuevo donde pueda proseguir su desarrollo. Este fragmento crece en todos sentidos y acaba por transformarse poco a poco en una masa más o menos esférica. Al cabo de uno o dos meses se procede a un nuevo transplante, y así sucesivamente. Es digno de tenerse en cuenta que las colonias celulares sometidas a numerosos transplantes presentan un aspecto muy diferente del de los tejidos normales correspondientes, pero con una morfología característica que es invariable dentro de una misma especie (figuras 3, 4).

En la actualidad hemos podido aislar más de 30 especies diferentes (espino albar, sauce, vid, bejuco de Virginia, tabaco, antirrino, zanahoria, patata de Jerusalén, etc.), alguna de las cuales cuenta ya con más de diez años de existencia.

Dichos tipos provienen de la proliferación de tejidos de plantas normales, pero también ha sido posible cultivar tejidos patológicos y en particular los tejidos de tumores. White, a quien debemos los primeros trabajos sobre esta categoría de tejidos, aisló un tipo derivado de « tumores genéticos » que producen espontáneamente ciertas variedades híbridas del tabaco. Posteriormente, en colaboración con Braun, ha conseguido cultivar tumores malignos del girasol y del nopal. Mencionemos de paso que nuestro colaborador M. Morel ha producido tejidos de tumor maligno procedentes de tumores en el tabaco y otras plantas. En los Estados Unidos, Black ha obtenido el desarrollo de tejidos de tumores muy peculiares ocasionados por la acción de ciertos virus. En fin nosotros mismos hemos provocado un extraordinario proceso tumoral sometiendo los cultivos de tejidos normales a un tratamiento prolongado con heteroauxinas. Después de este tratamiento los cultivos se comportaron como los cultivos tumorales típicos, y en particular presentaron los principales caracteres morfológicos y fisiológicos de los cultivos de tumores malignos.

Con objeto de establecer una comparación lo más exacta posible entre los tejidos normales y los tumorales, los investigadores han puesto especial empeño en obtener, a partir de una misma planta, los cultivos de las dos categorías de tejidos. En algunos casos el éxito ha coronado los esfuerzos y así hemos podido aislar de la patata de Jerusalén un tipo de tejido normal y otro de tumor maligno. Morel ha conseguido igualmente cultivos de estos dos tipos en el caso de la vid y el tabaco. En el caso de la scorzonera hemos desarrollado hasta tres categorías de cultivos: cultivos de tejidos normales, de tumores malignos y de « tumores químicos » originados por la acción prolongada de la heteroauxina.

Los investigadores no se han concretado a la consideración de la morfología externa de las colonias de tejidos, sino que han estudiado así mismo la estructura anatómica de éstos, y dicho examen ha puesto de relieve la existencia de dos categorías de organización. En contados casos, por ejemplo en el sauce y la vid, las colonias son enteramente parenquimatosas (figura 5) y representan cultivos puros de un solo tipo celular; pero, más frecuentemente, su estructura es heterogénea y están constituídas por una masa fundamental parenquimatosa en la que se hallan diseminadas (figuras 6 y 7) ciertas formaciones liberolignosas más o menos bien individualizadas, dentro de las cuales pueden verse elementos vasculares y vasos cribrosos asociados a las células del cambium.

REQUERIMIENTOS NUTRITIVOS DE LOS CULTIVOS DE TEJIDOS VEGETALES

Los medios de cultivo que permiten la proliferación de tejidos vegetales siempre contienen agua, gelosa como solidificante, sales minerales, un manantial orgánico de carbono (glucosa o sacarosa) y muy frecuentemente trazas de algunas substancias orgánicas que tienen el valor de factores de crecimiento (vitamina B_1, glicocola, ácido indoleacético, cistina, biotina, ácido pantoténico, etc.). Reiterado examen ha demostrado que todos los tejidos tienen aproximadamente las mismas necesidades de sales minerales y azúcares, pero en cuanto a factores de crecimiento sus exigencias difieren según sus especies. Ciertos tejidos como los de la patata de Jerusalén, bejuco de Virginia, etc., son incapaces de desarrollo si el medio no contiene heteroauxina (figura 8) pero proliferan con una grande actividad si contiene trazas de ácido indoleacético o de otra heteroauxina (figura

FI
ais

Su
In

FIG
die
sup
los

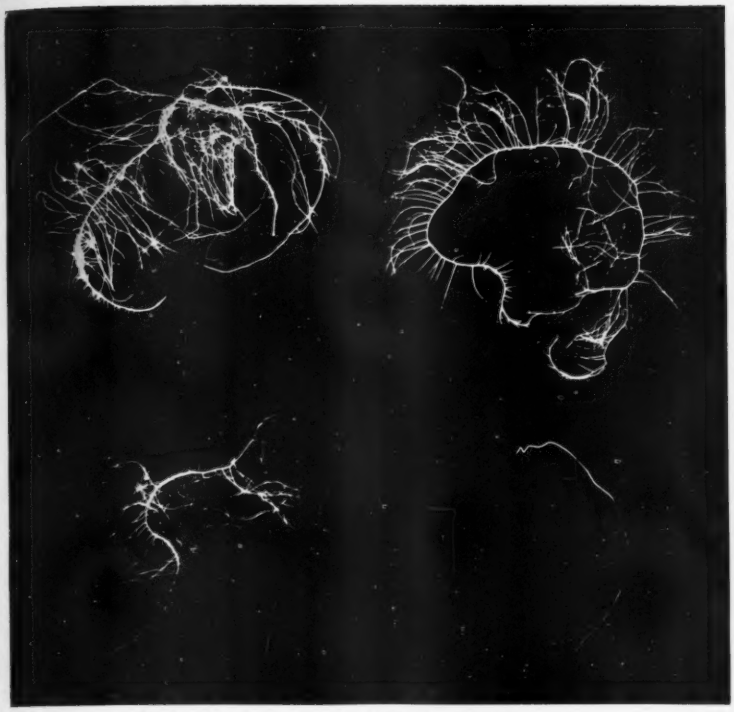


FIGURA 1 – *Cultivos de raíces aisladas (White). Esta fotografía presenta raíces aisladas provenientes de tipos que fueron transplantados varias veces.*

Superior izquierda: Petunia. *Superior derecha:* Trifolium repens.
Inferior izquierda: Nicotiana Langsdorffii. *Inferior derecha:* Daucus carota.

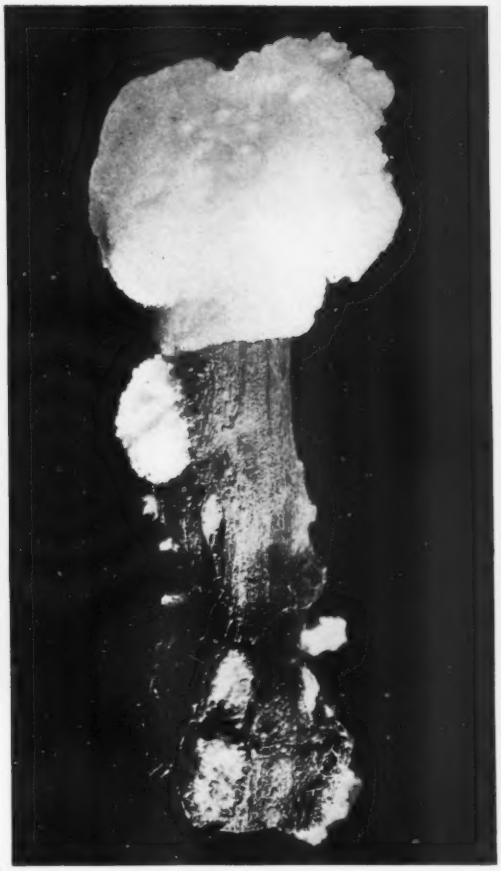


FIGURA 2 – *Fragmento de tallo de vid a los dos meses de cultivo. Adviértase como se ha desarrollado para formar una voluminosa protuberancia.* (× 5)

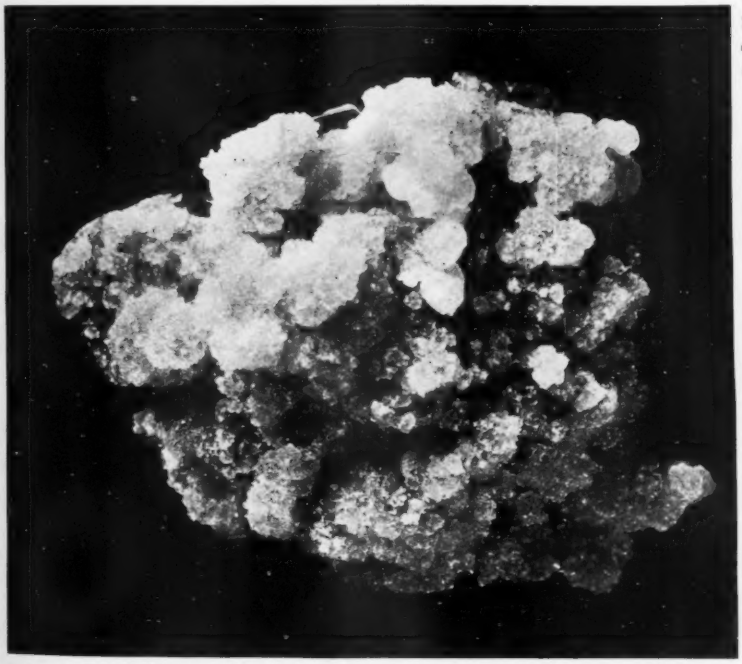


FIGURA 3 – *Cultivo de tejido de zanahoria, de dos meses, proveniente de un tipo de diez años de edad, transplantado 58 veces. Se observa que la colonia presenta una superficie apezonada, con nódulos parenquimatosos casi del todo aislados los unos de los otros.* (× 6·5)

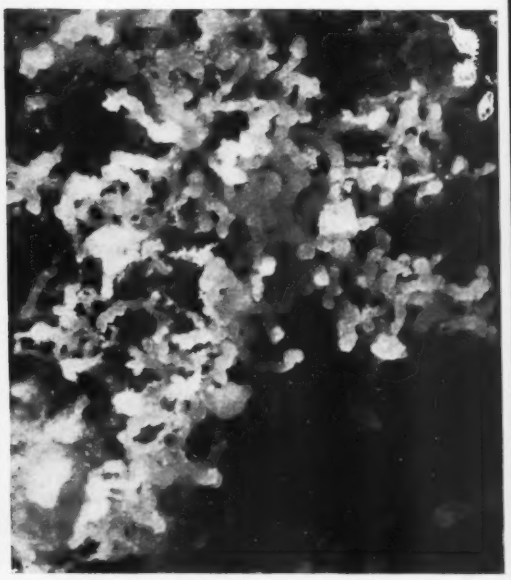


FIGURA 4 – *Cultivo de tejido de vid, de dos meses, proveniente de un tipo de tres años de edad. La superficie de la colonia presenta expansiones digitiformes que recuerdan las venillas plasmodiales de ciertos mixomicetos.* (× 18)

(Foto. de Vincent según M. Morel)

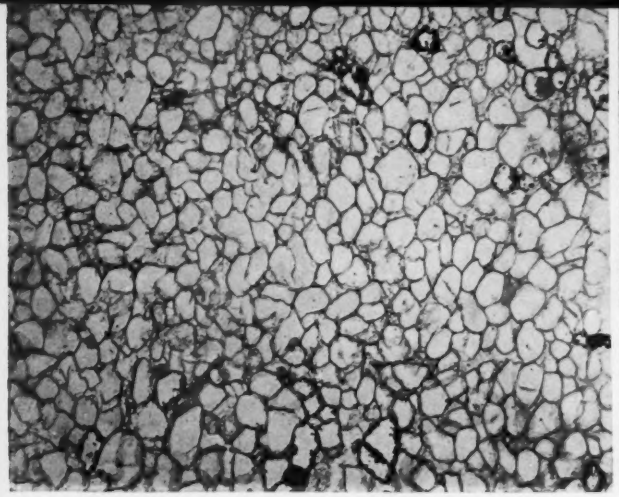


FIGURA 5 – *Sección del cultivo de parénquima de vid. Las células negras son elementos taníferos, el tanino fué precipitado por los líquidos fijadores.* (× 60)

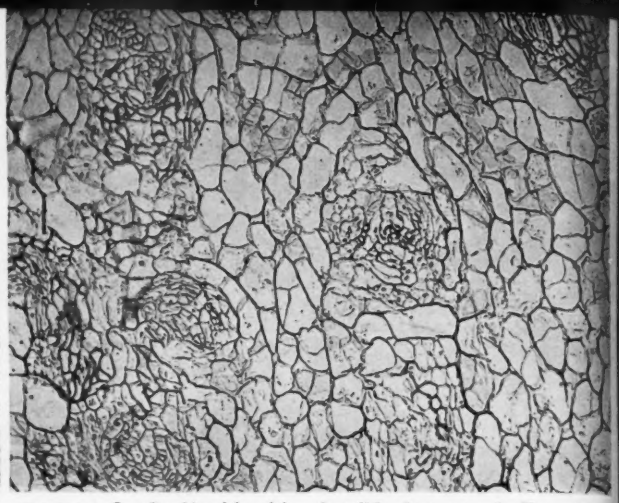


FIGURA 6 – *Sección del cultivo de tejido de patata de Jerusalén, de un tipo de 7 años de edad, transplantado 41 veces. La colonia está formada por un parénquima con nódulos cribrovasculares.* (× 80)

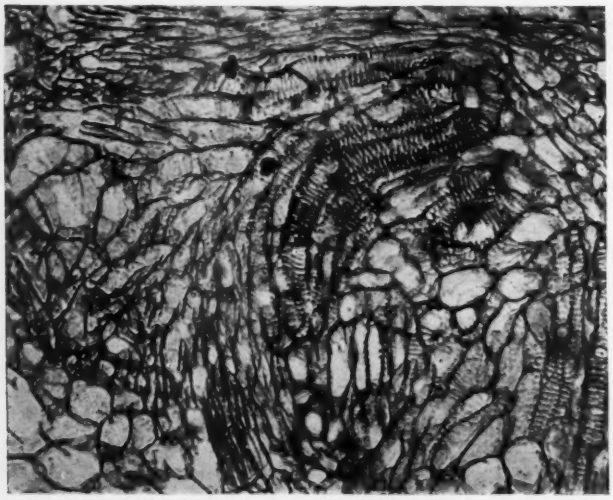


FIGURA 7 – *Detalles de las formaciones líbero-lignosas en un cultivo de tejido de endibia. Los elementos lignificados se les ve rodeados de masas cribrosas.* (× 300)

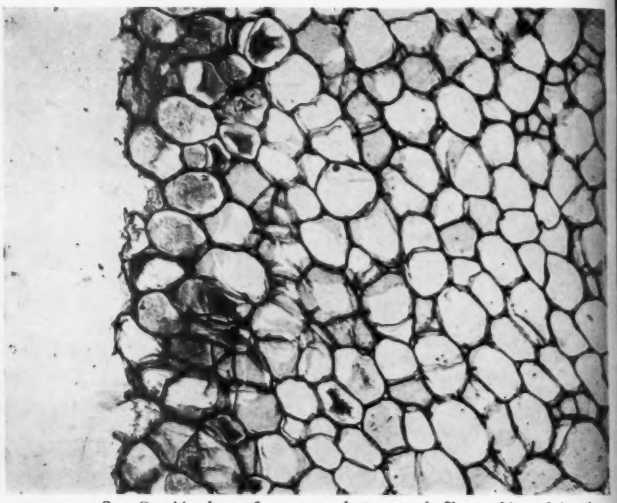


FIGURA 8 – *Sección de un fragmento de patata de Jerusalén cultivado durante dos meses en un medio desprovisto de heteroauxina. Las células no se multiplicaron.* (× 90)

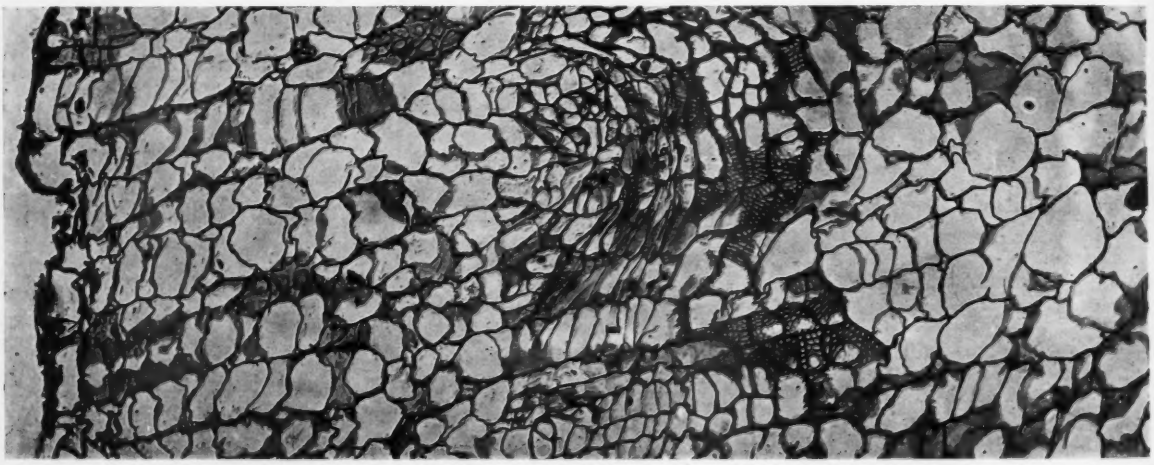


FIGURA 9 – *Sección de un fragmento de patata de Jerusalén cultivado durante dos meses en un medio conteniendo* 0,0001 *g. de ácido indoleacético por litro. Se observa la proliferación de la región superficial del* explantado *para formar una especie de parénquima en el interior del cual se han diferenciado elementos vasculares. Cada una de estas formaciones líbero-lignosas está constituida por un islote de líber y otro de células lignosas separada por una zona meristémica.* (× 160)

9). Otros tejidos, especialmente los de sauce y espino albar, tienen exigencias más específicas y su cultivo no puede llevarse a cabo sino en un medio que contenga los tres factores de crecimiento: ácido indoleacético, biotina y ácido pantoténico. Por el contrario otros como los de la zanahoria y la endibia no se les puede cultivar sino en un medio que contenga solamente sales minerales y glucosa, pero[1] la presencia de factores de crecimiento es susceptible de intensificar la proliferación. Finalmente hay que tener presente que los tejidos tumorales, cualesquiera que sean sus orígenes (genético, bacterial, químico, virológico), pueden ser cultivados sin la presencia de heteroauxinas y son casi insensibles a la acción estimulante formatriz de substancias de esta clase.

Los experimentos recientes de Skoog y Ropp nos autorizan a suponer que el comportamiento muy singular de los tejidos de tumores es debido al hecho de elaborar éstos una cantidad apreciable de ácido indoleacético.

CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES Y MORFOGENESIS

El estudio de los cultivos de tejidos hace posible el análisis de las condiciones de desarrollo de los órganos de la planta; se ha podido precisar el determinismo de los procesos de rizogénesis, haciendo actuar las heteroauxinas sobre los tejidos cultivados *in vitro*. El empleo de cultivos de tejidos ha permitido así mismo estudiar los factores de la neoformación de las yemas. Notemos de paso, en efecto, que en el curso de sus investigaciones sobre el cultivo de tejidos de tabaco, White ha constatado que la formación de las primeras hojas es facilitada por la inmersión de las colonias en un medio nutritivo. Estos resultados fueron confirmados por Skoog, quien al propio tiempo examinó el efecto de la luz, temperatura, y heteroauxinas en la formación de las yemas, e investigó las condiciones en las que los órganos pueden originar colonias no diferenciadas, y viceversa. A todo esto podemos añadir, por fin, que nosotros mismos hemos estudiado el determinismo de la formación de las yemas utilizando el tejido de la albura del olmo.

Las observaciones anatómicas realizadas en los cultivos de zanahoria, patata de Jerusalén, endibia, etc., han dejado bien sentado que las zonas meristémicas aparecen siempre en la línea de separación de dos tejidos de naturaleza diferente, y gracias a este examen ha sido posible analizar también el proceso de desenvolvimiento de las formaciones cribro-vasculares que aparecen en el seno de los tejidos primitivamente homogéneos. Algunos de los importantes experimentos llevados a cabo por Camus han evidenciado que las yemas injertadas *in vitro* ejercen una acción histógena que supone un proceso de dediferenciación seguido de fenómenos de diferenciación y organización.

Finalmente nos cumple indicar que los numerosos experimentos realizados en las raíces de la zanahoria y endibia han establecido que la disimetría de la planta es efecto de un mecanismo humoral caracterizado por el transporte de una substancia morfogénica desde las hojas a las raíces.

CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES Y FISIOLOGIA

La primordial finalidad de los que llevaron a término los primeros cultivos *in vitro* fué la determinación de los factores químicos de la multiplicación celular. Los resultados de Robbins, White y Bonner sobre las raíces aisladas han proclamado desde hace mucho tiempo que la proliferación de los meristemos radiculares requiere sales minerales, un azúcar poco complejo (glucosa o sacarosa) y otras substancias orgánicas como la glicocola, vitamina B_1, vitamina B_6, ácido nicotínico, cuya naturaleza varía, no obstante, según las especies.

Con todo, las investigaciones acerca de los cultivos de tejidos condujeron a resultados diferentes. Los tejidos cultivados *in vitro* pueden proliferar en ausencia de las substancias indicadas; pero en ciertos casos se les deben suministar otros elementos de los ya mencionados anteriormente, como la heteroauxina, biotina y ácido pantoténico.

CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES Y LA PATOLOGIA

Los primeros trabajos de esta naturaleza fueron obra de White, quien en 1934 se sirvió de raíces de tomate aisladas para el cultivo de virus-proteínas que, como es sabido, son incapaces de crecimiento en un medio inerte. Segrétain llegó a resultados análogos empleando cultivos de tejidos, y recientemente Morel ha extendido este método al cultivo de ciertos parásitos como el mildiú y el oidium de la vid. Estos estudios tienen una importancia considerable puesto que hacen posibles los experimentos sobre los agentes patógenos, que en un principio no podían verificarse sino mediante métodos de observación.

[1] Con el fin de prevenir la interferencia de impurezas que posiblemente contengan factores de crecimiento, se hace indispensable en ciertos experimentos el abandono del uso de gelosa como solidificante del medio nutritivo, y del algodón en rama para taponar los recipientes de cultivo. Se emplea entonces una cinta de cristal empapada en una solución nutritiva y se cierran los recipientes con cápsulas de papel de estaño.

Revista de libros

LA HISTORIA DE LAS CIENCIAS FISICAS

The Growth of Physical Science, *por Sir James Jeans. Págs. x + 364, con un frontispicio y 13 planchas. University Press, Cambridge.* 1947. *Precio neto,* 12*s.* 6*d.*

No sólo era Sir James Jeans un investigador científico de primer orden sino que poseía además el raro y envidiable don de saber interpretar la ciencia para el lector lego, con lo que sus libros de popularización de astronomía y cosmología gozan aún de gran circulación, y sus conferencias públicas atrajeron siempre numerosos oyentes. La obra presente, que describe las líneas generales del progreso de la ciencia física (incluso la astronomía y matemáticas), alcanzará sin duda idéntico éxito entre un público general, ya que posee toda la lucidez y agradable estilo de sus predecesores. Sin embargo, el especialista en historia de la ciencia no podrá aprobar sin reservas dicho trabajo. Las líneas generales del mismo aparecen tratadas con el acostumbrado talento de Jeans, y en aquellas ramas en las que el autor era un especialista presenta sus detalles con exactitud y apropiada selección. Hay, con todo, excesivos errores de detalle, como por ejemplo en la implicación de que la alquimia dejó de practicarse en Alejandría después del Decreto que contra dicha actividad publicó Diocleciano; se dice, con buen fundamento, que los árabes tomaron los numerales de la India, pero no se menciona la fundamental adición de la cifra cero; se da excesiva importancia a los trabajos de Mayow sobre la combustión; y aparecen numerosas erratas, tales como Mikola por Nikola (Copérnico), Humphrey por Humphry (Davy), Canizzaro por Cannizzaro, y Amerigo por Amedeo (Avogadro). Tales errores, y otros similares, aunque sin importancia en sí mismos son tan numerosos que son un serio borrón en lo que hubiera podido ser un excelente libro, y deben corregirse en las futuras impresiones.

LOS RASTROS DE LAS PARTICULAS

Nuclear Physics in Photographs; tracks of charged particles in photographic emulsions, *por C. F. Powell y G. P. S. Occhialini. Págs. viii + 154, con 50 planchas. Oxford University Press.* 1947. *Precio neto,* 18*s.*

La física nuclear se ha convertido en un estudio que requiere un instrumental de gran complicación y elevado coste — ciclotrones, betatrones, etc. — siendo por lo tanto agradable encontrar que existe una importante rama de investigación que no usa más que una placa fotográfica y un microscopio. Es cierto que las placas hoy en uso son de un tipo especial, pero las primeras investigaciones se realizaron con placas ordinarias. Desde hace mucho tiempo se sabe que una placa fotográfica registra el paso de ciertas partículas ionizantes, tales como los Rayos alfa emanados del radium, y que bajo ciertas condiciones favorables y una magnificación adecuada se puede observar el rastro de una partícula en la forma de una línea de puntos espaciados sobre la emulsión fotográfica. El Dr. Powell y sus colaboradores en Bristol han realizado un estudio prolongado de dichos efectos, habiendo aplicado asimismo el método al estudio de los rastros producidos en la emulsión bajo la acción de otras tipos de radiación.

En lo que se refiere al texto, la obra presente es un estudio breve y claro de los principios fundamentales de la física nuclear, yendo ilustrado cada capítulo por una serie de planchas que muestran los rastros de partículas que sirven de ejemplo a los principios estudiados. Planchas magníficas, en verdad, que prueban el gran progreso realizado en dicha técnica, debido en gran parte a la excelente tarea realizada por el personal de investigación de Ilford al preparar las emulsiones fotográficas especiales. Tales imágenes convierten los procesos de la física nuclear en algo extraordinariamente vívido. En muchos aspectos, este método es similar al de la Cámara de Wilson, pero ofrece la ventaja de registrar eventos raros, ya que la placa puede recoger todo lo que sucede en ella durante un período de semanas.

Muy recientemente las investigaciones de Powell han hecho casi cierto el hecho de que existe más de un tipo de « electrones pesados », o mesotrones, el primero de los cuales fué descubierto, poco antes de la guerra, por Anderson. Es asimismo probable que exista también un mesotrón sin carga, especie de primo pobre del neutrón. De modo que el número de partículas « elementales » crece sin cesar, habiendo desaparecido la antigua simplicidad de protón y electrón. Pero esta creciente complejidad es buen signo, ya que indica que estamos próximos a una nueva síntesis que sin duda ha de servir para ayudarnos a resolver los misterios atómicos que aún restan.

G. P. THOMSON

PALEOBOTANICA

An Introduction to Palaeobotany, *por Chester A. Arnold. Págs.* 431, *con* 187 *figuras. McGraw-Hill Publications, Londres.* 1947. *Precio neto,* 27*s.* 6*d.*

Siempre han sido escasos los libros sobre la botánica fosil, y mucho más durante los diez años últimos, por estar agotados los textos más importantes. Para salvar tal deficiencia ha publicado el presente volumen el Profesor Arnold, de la Universidad de Michigan. Era su intención producir un libro conciso, pero suficientemente completo para que pudiera ser utilizado por los estudiantes y sirviese al mismo tiempo para incrementar el interés en la paleobotánica, señalando la importancia de dicha ciencia a los botánicos y geólogos. Desde ya puede decirse que el autor ha conseguido plenamente su propósito: su libro ha de ser bien recibido donde exista un interés vivo por la evolución vegetal.

Contiene la obra mucha información de la que un estudiante avanzado siente siempre gran interés por adquirir: la técnica del estudio de los fósiles, y la interpretación de los datos en relación con la evolución de las especies vegetales más importantes son temas en ella tratados. En algunos puntos, su autor mantiene la teoría clásica, en otros avanza nuevas hipótesis, o vacila en emitir un juicio hasta poseer mejor conocimiento de causa. El autor siente un gran entusiasmo por el objeto de su estudio, pero al mismo tiempo muestra gran cautela en la interpretación de los datos del mismo.

La obra va copiosamente ilustrada con numerosas fotografías, nuevas y originales, habiéndose evitado en lo posible la publicación de ilustraciones ya impresas, procedimiento que tiene ciertos inconvenientes intrínsecos, ya que en ciertos casos es evidente que algunas figuras clásicas deben conservar siempre su lugar.

Debemos felicitar al autor por la producción de un texto de lectura altamente agradable e instructiva.

C. W. WARDLAW